



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

**VÝROBA VODÍKU ELEKTROLÝZOU  
A MOŽNOSTI ZVYŠOVÁNÍ ÚČINNOSTI**

EFFICIENCY OF HYDROGEN PRODUCTION BY ELECTROLYSIS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Ondřej Pelán

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Ján Poláčik

BRNO 2017



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Ondřej Pelán**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Ján Poláček**  
Akademický rok: 2016/17

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:

## Výroba vodíku elektrolýzou a možnosti zvyšování účinnosti

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vodík je perspektivní palivo, avšak nedostatkem pro jeho aplikaci v praxi je nízká účinnost výroby. Vodík se využívá i jako palivo pro výrobu elektrické energie. Zároveň je snaha o akumulaci elektrické energie do vodíku. Elektrolýza vody je nejjednodušší proces získávání vodíku, ale základem je dostatečná efektivita tohoto procesu. Pro zvýšení účinnosti je potřebné snížit poměr elektrické energie přeměněné na tepelnou energii.

### Cíle bakalářské práce:

1. Rešerše zaměřená na popis vlastností vodíku, výhody jeho využití, současné způsoby výroby a skladování
2. Popis možností zvyšování účinnosti se zaměřením na pulzní elektrolýzu
3. Praktické měření a výpočet účinnosti výroby vodíku pomocí HHO generátoru
4. Návrh využití elektrolýzy v zařízení pro akumulaci elektrické energie „power to gas system“

### Seznam literatury:

SORENSEN, Bent. Hydrogen and fuel cells: emerging technologies and applications. 2nd ed. Burlington, MA: Academic Press, c2012. ISBN 0123877091.

KAMEŠ, Josef. Alternativní palivo - vodík. Praha: [s.n.], 2008. ISBN 978-80-254-1686-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne - 4 -11- 2016



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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt**

Tato práce shrnuje základní informace o vodíku, jeho výrobě, skladování a energetickém využití. Důraz je kladen na alkalickou elektrolyzu, faktory ovlivňující její účinnost a důsledky zavedení pulzujícího napětí. Závěr práce se snaží experimentální metodou dokázat možnost regulace výkonu alkalického elektrolyzéro.

## **Abstract**

This thesis summarizes the basic information on hydrogen, its production, storage and energy utilization. The emphasis is put on alkaline electrolysis, the factors affecting its efficiency and the results of applying pulsating direct current. The end of the thesis attempts to experimentally prove the possibilities of regulating the performance of the alkaline electrolyzer.

## **Klíčová slova**

Vodík, alkalická elektrolyza, skladování energie, regulace výkonu, Power-to-Gas systém

## **Key words**

Hydrogen, Alkaline water electrolysis, Energy storage, Power regulation, Power-to-Gas system

## **Bibliografická citace**

PELÁN, O. *Výroba vodíku elektrolyzou a možnosti zvyšování účinnosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ján Poláčik.

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že bakalářskou práci na téma „Výroba vodíku elektrolýzou a možnosti zvyšování účinnosti“ jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně, dne .....

.....

Pelán Ondřej

## **Poděkování**

Děkuji především vedoucímu své bakalářské práce Ing. Jánovi Poláčikovi za seznámení s koncepcí vodíkového hospodářství a všestrannou podporu. Děkuji také své rodině, bez které bych nebyl tím, kým jsem.



# Obsah

ÚVOD .....	11
1. VODÍK.....	12
1.1. Vlastnosti .....	12
1.2. Výroba .....	13
1.2.1. Parní reforming.....	14
1.2.2. Parciální oxidace.....	14
1.2.3. Elektrolýza.....	15
1.2.4. Termochemický S-I cyklus.....	16
1.2.5. Výroba z biomasy.....	16
1.3. Skladování .....	17
1.4. Energetické využití vodíku .....	18
1.4.1. Palivový článek .....	18
2. ELEKTROLÝZA .....	19
2.1. Princip elektrolýzy .....	19
2.2. Elektrolyzér.....	20
3. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ÚČINNOST ELEKTROLÝZY.....	22
3.1. Teplota .....	22
3.2. Tlak .....	22
3.3. Vzdálenost elektrod .....	23
3.4. Aktivní plocha elektrod .....	23
3.5. Napětí na článku .....	23
3.6. Pulzující napětí .....	23
4. POWER-TO-GAS SYSTÉM S VYUŽITÍM ALKALICKÉ PDC ELEKTROLÝZY.....	25
4.1. Power-to-Gas technologie.....	25
4.2. Regulace alkalického elektrolyzéru .....	27
4.3. PDC regulace .....	27

5. EXPERIMENT: PDC REGULACE ALKALICKÉHO ELEKTROLYZÉRU .....	29
5.1. Předpoklady měření.....	29
5.2. Měřicí trať .....	29
5.3. Použité přístroje a měřicí aparatura.....	31
5.4. Postup měření .....	31
5.5. Výsledky měření.....	32
5.6. Zhodnocení výsledků měření .....	34
ZÁVĚR.....	35
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	36

## Úvod

Heslo dnešní doby by mohlo znít: Více energie, méně znečištění.

Přestože lidstvo požaduje stále více energie, začíná si uvědomovat následky svého jednání vůči přírodě. Proto se v oblastech výroby energie stále více prosazují obnovitelné zdroje. To však přináší dvě základní úskalí. První je značná nestabilita obnovitelných zdrojů (větrné a solární elektrárny) a druhý problém představuje cesta takto získané energie do mobilních aplikací. Odpovědí na tyto problémy by mohlo být vodíkové hospodářství.

Vodík je se svými vlastnostmi ideálním energetickým vektorem. Je schopný pojmout velké množství energie, spalováním vzniká jen čistá voda a lze ho dobře převádět na elektrickou energii a zpět. Dobrým příkladem je přeměna chemické energie vodíku v palivových článcích. Není totiž omezena Carnotovým cyklem a může tak dosahovat vysokých účinností.

Přestože se dnes vodík vyrábí převážně z uhlovodíků, nabízí výroba z vody mnoho benefitů. Mezi ně patří právě možnost ukládat elektrickou energii, čistota, kompaktnost a modularita zařízení a potenciál zvyšování účinnosti.

Jedním z nejzásadnějších faktorů ovlivňujících elektrolýzu je zavedení elektrických pulzů. Dosavadní výzkumy zmiňují, že zavedením pulzů a vytvořením rezonančního obvodu lze zvýšit účinnost elektrolýzy až o 15 %. Tato práce zase poukazuje na možnosti regulování výkonu elektrolyzérů změnou objemu použitých pulzů.

Power-to-gas systém je ucelený komplex výroby, skladování a spotřeby vodíku a metanu napojený na elektrickou a plynofikační síť. Popisuje zavedení vodíkového hospodářství do stávajícího energetického uspořádání. Tím se maximalizuje využití a spotřeba vyrobené energie a snižuje se negativní vliv na životní prostředí.

Cílem práce je přiblížit vodík jako energetický nosič a poukázat na praktické věci spojené se zaváděním vodíkového hospodářství. Poznatky této práce mohou přispět k optimalizaci regulace alkalických elektrolyzérů a tím k jejich efektivnějšímu využívání v Power-to-gas systémech.

# 1. Vodík

V současné společnosti se o vodíku ví především to, že je velmi hořlavý a výbušný. To, že je běžně používán při mnoha procesech a nakládání s ním je často bezpečnější, než s benzínem, už mnoho lidí neví. Tato kapitola se zaměřuje na stručný přehled vlastností, způsoby výroby a skladování a energetické využití. [1, 16]

## 1.1. Vlastnosti

### Fyzikální vlastnosti

- bezbarvý plyn bez chuti a zápachu (tvořený molekulami  $H_2$ )
- ze všech plynů se nejvíce blíží vlastnostem ideálního plynu
- vyskytuje se ve třech izotopech:
  - o *Procium* má v jádře jeden proton (99,98 % veškerého vodíku)
  - o *Deutérium* v jádře má jeden proton a jeden neutron
  - o *Tritium* v jádře má jeden proton a dva neutrony – radioaktivní
- je náročně zkapalnitelný (teplota varu - 252.76 °C)

### Chemické vlastnosti

- vždy jednovazný
- slučuje se s většinou prvků, nejochotněji s nekovy
- za normální teploty reaguje jen s fluorem a chlorem
- výbušný ve vzduchu
- afinita vodíku ke kyslíku se využívá při redukci oxidů kovů
- často vázán kovalentní vazbou s polárním charakterem
- kation  $H^+$  je nositelem kyselých vlastností
- mezi výrazně polárními molekulami tvoří vodíkové můstky ( $HF$ ,  $HCl$ ,  $H_2O$ )

### Výskyt

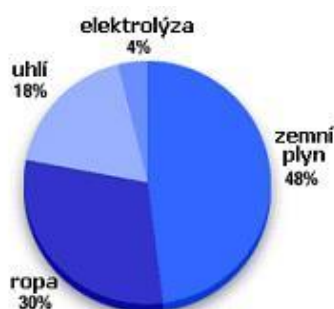
- nejrozšířenější prvek ve vesmíru
- na Zemi především ve vodě a ve velkém množství organických sloučenin [1]

Tabulka 1: Vlastnosti vodíku v porovnání s jinými palivy [2]  
(NTP-normální podmínky)

Vlastnost	Vodík	Metan	Etanol	Benzín
hustota, plynná fáze (NTP) [kg m <sup>-3</sup> ]	0.0899	0,651	-	-
hustota, kapalná fáze [kg m <sup>-3</sup> ]	70.8	422,6	789,3	720-780
teplota tání [°C]	-259.1	-182,3	-114,15	-40
teplota varu [°C]	-252.76	-161,15	78,29	-
výhřevnost [MJ Kg <sup>-1</sup> , (kWh kg <sup>-1</sup> )]	119.9(33.3)	50,0(13,9)	-	44,6(12,4)
spalné teplo [MJ Kg <sup>-1</sup> , (kWh kg <sup>-1</sup> )]	141.9(39.4)	55,5(15,4)	29,9(8,3)	47,4(13,2)
objemová hustota energie [GJ m <sup>-3</sup> ]	10.10(kapalina)	230(kapalina)	23,6	34,85
	0.013(plyn)	0,651(plyn)	-	-
teplota plamene [°C]	2045	1875	-	2200
teplota samovznícení [°C]	585	540	423	228-501
iniciační energie potřebná k zapálení [mJ]	0.2	0,29	-	0,24
meze výbušnosti ve vzduchu [obj. %]	4-75	5,3-15	4,3-19	1,0-7,6
rychlost šíření plamene (m s <sup>-1</sup> )	2.65	0,4	-	0,4
rychlost rozptýlení se do vzduchu [cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	0.61	0,16	-	0,05
toxičnost	Ne	Ne	Ne	Ano

## 1.2. Výroba

Vodík je možné vyrábět mnoha způsoby a z mnoha zdrojů. Následující kapitola popisuje konvenční výrobu z fosilních paliv a alternativní výrobu vodíku z vody a biomasy. Výroba z fosilních paliv je v dnešní době nejlevnější, a proto i nejrozšířenější (více než 90 % výroby). V konceptu vodíkového hospodářství je však z důvodu velké produkce odpadního CO<sub>2</sub> nevyužitelná (na 1 kg H<sub>2</sub> připadá 7,05 kg CO<sub>2</sub>). Oproti tomu stojí „ekologická“ výroba vodíku z vody a biomasy, která je však drahá a často jen ve fázi vývoje. [1, 3]

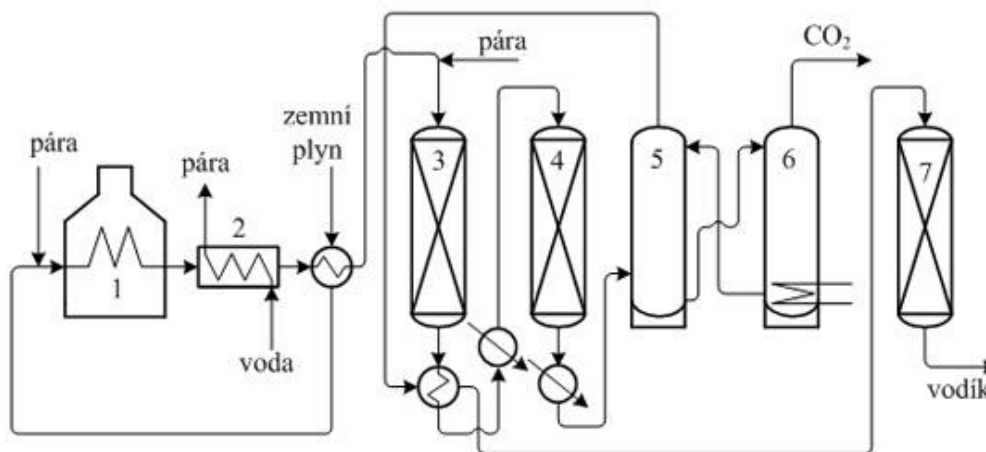
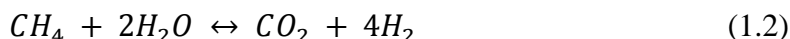
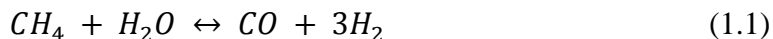


Obr. 1 Podíl energetických zdrojů na výrobě vodíku [3]

### 1.2.1. Parní reforming

Nejčastější surovinou pro parní reforming je zemní plyn (metan), ale dají se použít i jiné lehké uhlovodíky, které jsou vedlejším produktem z rafinerií. [4]

Metan reaguje s vodní párou při teplotách 750-800 °C, tlacích 3-5 MPa a za pomoci katalyzátoru na bázi oxidu nikelnatého. Reakce jsou vratné (a proto je třeba je provádět s přebytkem reaktantů) [4]



Obr. 2 Schéma parního reformingu [4]

Reakce (1.1) a (1.2) probíhají v peci, v trubkách s katalyzátorem. Reakční produkty odtud pokračují přes parní generátor a výměník, kde se ochladí přibližně na 360 °C do konvertorů. Zde reaguje CO s další párou za vzniku CO<sub>2</sub> a dalšího vodíku. [4]

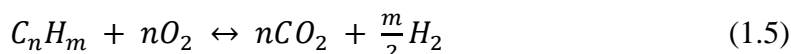


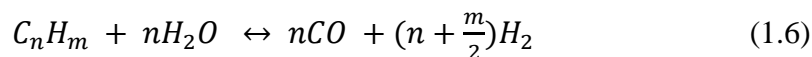
To se děje ve dvou stupních. První stupeň je tzv. vysokoteplotní, protože reakce (1.3) je exotermní (nárůst teploty na cca 500 °C), zvýšená teplota zmenšuje výtěžek CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>, proto se produkty na výstupu chladí. V druhém stupni při teplotách 180-230 °C se sníží koncentrace CO až na 0,2 - 0,3 % obj. Následně je vyprán CO<sub>2</sub> a je-li to potřeba, přemění se zbytek CO<sub>2</sub> a CO zpět na metan, reakce (1.1) a (1.2). [4]

### 1.2.2. Parciální oxidace

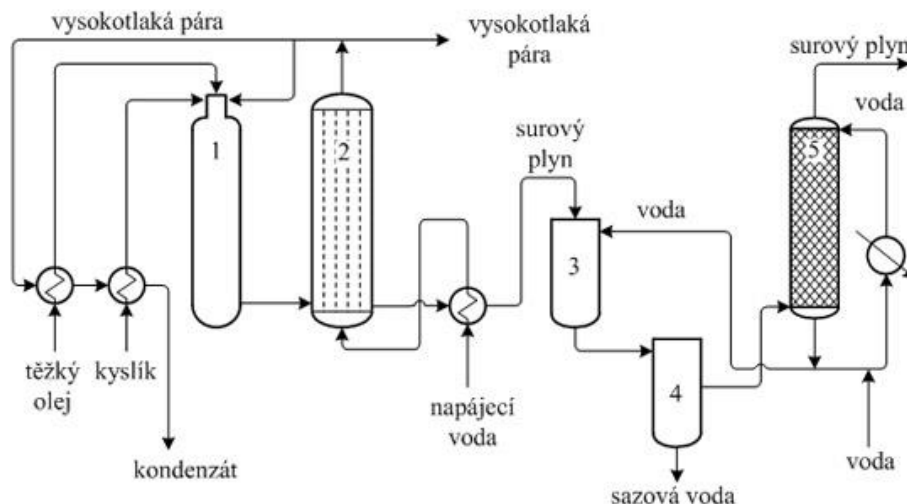
Jako výchozí surovina se používají plynné i kapalně frakce z různých procesů zpracování ropy. Nejčastěji se však zplyňují těžké ropné frakce, které jsou jinak těžko využitelné. [5]

Proces zplyňování pobíhá při teplotách 1300-1500 °C a tlacích 3-8 MP. Surovina, obecně C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> je zplyňována kyslíkem a vodní parou. [5]





Mimo jiné zde probíhá i reakce dle rovnice (1.3).

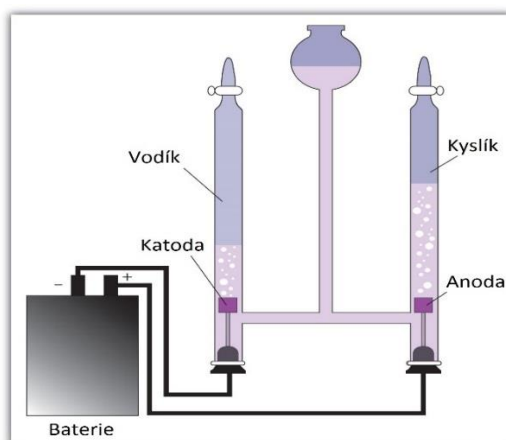


Obr. 3 Schéma parciální oxidace [5]

Tyto reakce probíhají ve zplyňovacím reaktoru. Zde se přehřátý těžký olej (popř. jiná surovina) vstříkuje hořáky do proudu přehřáté směsi kyslíku a vodní páry. Vzniklý generátorový plyn prochází kotlem na výrobu vodní páry, kde se ochlazuje na teplotu asi 260°C. Ochlazováním generátorového plynu vzniká přehřátá pára o tlaku až 12MPa. V procesu se použije asi 20 % této páry a zbytek je možné využít jinak. Generátorový plyn se ještě dochlazuje nástřikem vody, což odstraní i větší části sazí. Surový generátorový plyn se vypráním zbaví kyanovodíku a sulfanu. Proces končí stejně jako u parního reformingu – převedením CO na CO<sub>2</sub> a metanizací, reakce dle rovnic (1.1) a (1.2). [5]

### 1.2.3. Elektrolýza

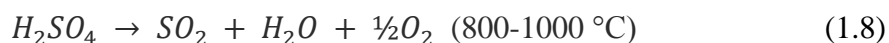
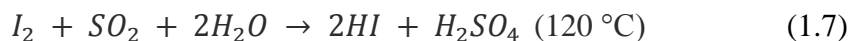
Elektrolýza vody je nejstarší způsob výroby vodíku. Jde o elektrochemickou reakci, při které proud procházející vodou štěpí její molekuly na vodík a kyslík. Elektrolýzou se podrobně zabývá kapitola 3. *Elektrolýza*.



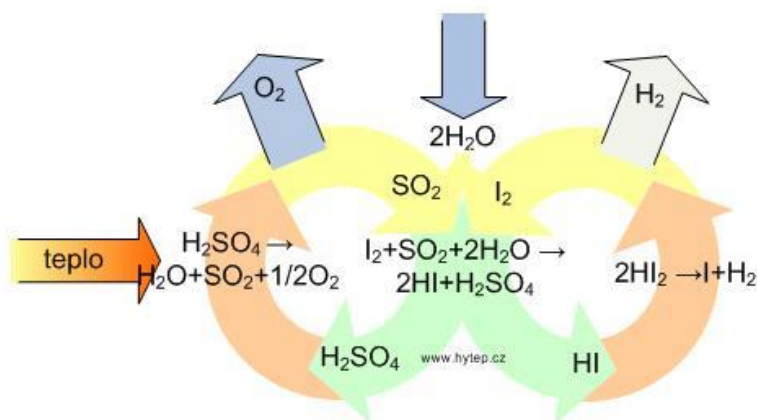
Obr. 4 Hoffmanův přístroj [6]

### 1.2.4. Termochemický S-I cyklus

Siřičito-jódový cyklus je sérií chemických reakcí, které štěpí vodu za pomoci vysokopotenciálního tepla. Cyklus je uzavřený, a tak jsou vstupními surovinami jen teplo a voda, ostatní použité chemické látky se na konci cyklu znovu vracejí do oběhu.



Jako první reaguje voda s jódem a oxidem siřičitým za vzniku kyseliny sírové a jodovodíkové, reakce je exotermická. Produkty se následně termicky rozkládají. Kyselina sírová se rozkládá při teplotě 800-1000 °C a kyselina jodovodíková při teplotě 450°C. [7]



Obr. 5 S-I cyklus [3]

V laboratorních podmínkách je již proces zvládnutý a jeho účinnost se pohybuje v rozmezí 40-52 % (50 % při 950 °C), s nárůstem teploty by měla růst i účinnost. Při přechodu do průmyslového měřítka však bude potřebné překonat různé překážky spojené s vysokými teplotami a agresivitou použitých kyselin. [3, 7]

### 1.2.5. Výroba z biomasy

Přestože množství vodíku vyrobeného z biomasy pravděpodobně nebude schopné pokrýt veškeré budoucí potřeby, jeví se tato technologie jako velmi zajímavá. Při využití odpadní biomasy by mohlo jít o nejúčinnější metodu jejího energetického využití. Technologicky by se výroba vodíku z biomasy dala rozdělit na výrobu ze "suché" biomasy a biomasy s vysokým obsahem vody. "Suchá" biomasa je vlastně směsí uhlovodíků, a proto je možné ji zpracovávat klasickými termochemickými procesy, například parním reformováním biomasy nebo parciální oxidace viz kapitoly 1.2.1. a 1.2.2. Pro zpracování vlhké biomasy využíváme biotechnologické procesy, při kterých jsou reakce katalyzovány mikroorganismy. [3, 8]



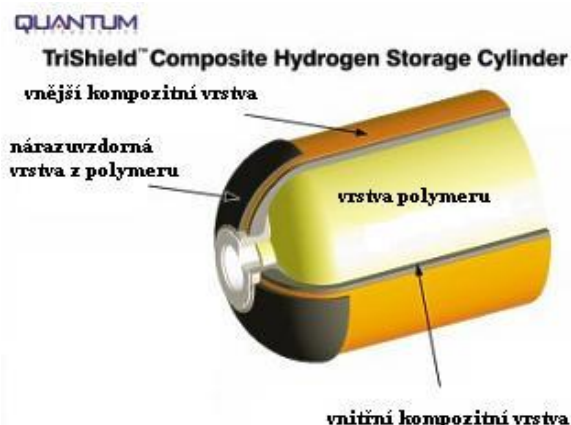
### 1.3. Skladování

Skladování vodíku můžeme rozdělit do dvou skupin, konvenční a alternativní. Konvenční způsob skladování představují tlakové nádoby na plynný vodík a kryogenní nádoby na kapalný vodík. Tyto způsoby a jejich bezpečnost jsou ověřeny mnoha lety používání, ale přestávají stačit stále vyšším požadavkům na mobilní aplikace. Nízkotlaké skladování se sice jeví jako velmi výhodné pro dlouhodobé skladování a je i energeticky nenáročné (tlak dodávaný elektrolýzou je dostačující), avšak v případě větší požadované hustoty je nutné stlačení, nebo zkapalnění a to vyžaduje další energii. V případě stlačení na 350bar dosahuje tato energie přibližně 30 % energie uložené v palivu a v případě zkapalnění asi 40 % energie uložené v palivu. Při zkapalnění navíc dochází prostupem tepla k odpařování a tak nárůstu tlaku, je tedy z bezpečnostních důvodů nutné upouštění vodíku. Takto vzniklé ztráty dosahují až 3 % z obsahu za den. [9]

Alternativní způsoby skladování se jeví jako velmi zajímavé, ale jsou stále ve fázi vývoje. Nejznámější z nich je skladování vodíku v hydridech kovů. Tyto hydridy dokáží vodík absorbovat a při dodání tepla ho zase uvolňují. [7]

Tabulka 2 Energetické parametry při různém skladování vodíku v porovnání s benzínem [10]

Palivo (20 °C) Druh/skupenství	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	Výhřevnost [MJ/kg]	Hustota energie [MJ/l]
Vodík 1 bar	0,084	119	0,01
Vodík 350 bar	22,2	119	2,64
Vodík 700 bar	39	119	4,6
Vodík kapalný (-253 °C)	71,08	119	8,46
Benzín	700	44,5	31,15



Obr. 6 Kompozitní tlaková láhev na skladování vodíku [11]

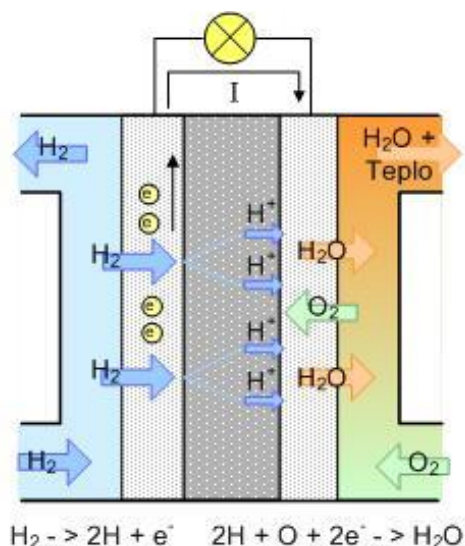
## 1.4. Energetické využití vodíku

Pro uvolnění energie uložené ve vodíku máme dva způsoby. Prvním je spálení ve spalovacím motoru (turbíně) a převedení na mechanickou práci a druhý způsob je použití palivových článků, které vyrábějí elektrickou energii. Přestože spalování vodíku ve spalovacím motoru je dnes dobře zvládnutá technologie, spalovací motory mívají účinnosti jen 20-30 %. Oproti tomu palivové články mívají účinnosti 35-50 % a to s perspektivou dalšího vzrůstání. [12, 13]

### 1.4.1. Palivový článek

Palivový článek je zařízení přeměňující chemickou energii vodíku a kyslíku na energii elektrickou. Oproti galvanickým článkům využívají palivové články kontinuálně přiváděné palivo. Tím může být vodík čistý nebo vázaný v některých sloučeninách, jako je například metanol. [14]

Princip spočívá v prostupu vodíkových kationtů (protonů), případně kyslíkových aniontů, přímo přes membránu mezi elektrodami, zatímco elektrony, které nejsou schopné touto membránou projít, jsou nuceny procházet vnějším okruhem a mohou tak konat užitečnou práci.

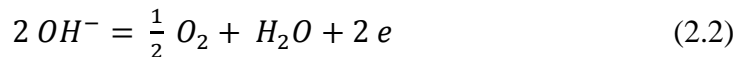
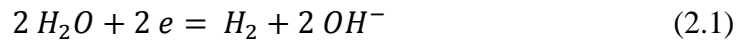


Obr. 7 Schéma palivového článku s polymerní membránou [15]

## 2. Elektrolýza

### 2.1. Princip elektrolýzy

Elektrolýza vody je děj, při kterém elektrický proud na elektrodách štěpí molekuly vody na vodík a kyslík. Čistá voda je však málo vodivá, a proto se používají elektrolyty (např. KOH, NaOH). [1] Na elektrodách probíhají tyto reakce.



Z energetického hlediska se elektrolýza vody řídí následující rovnicí:

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (2.3)$$

Entalpie  $\Delta H$  udává celkovou energii potřebnou na rozklad vody a ta se rovná spalnému teplu vodíku. Hodnotou  $\Delta G$  je Gibbsova energie, udávající minimální množství práce, kterou musíme vynaložit na rozštěpení 1 molu vody na vodík a kyslík.  $\Delta S$  je entropie procesu a  $T\Delta S$  podíl tepla potřebného na průběh reakce. [1, 7]

Pro množství vyloučeného vodíku a kyslíku platí podle Faradayových zákonů následující vztahy:

$$M_{H_2} = I * \frac{\tau}{2F} \quad (\text{mol } H_2) \quad (2.4)$$

$$M_{O_2} = I * \frac{\tau}{4F} \quad (\text{mol } O_2) \quad (2.5)$$

$I$  je proud protékající elektrolýzou [A],  $\tau$  čas, po který probíhá elektrolýza [s] a  $F$  Faradayův náboj (96 487 C).

Minimální množství energie, kterou musíme dodat na rozklad 1 molu vody je dané hodnotou  $\Delta G$ . Množství elektrické práce k rozložení 1 molu vody je  $2 * F * E$ .  $F$  je Faradayův náboj a  $E$  napětí jednoho článku elektrolýzera. [1] Platí:

$$\Delta G = 2 * F * E_{rov} \quad (2.6)$$

**Rovnovážné napětí  $E_{rov}$  [V]** je minimální napětí potřebné na průběh elektrolýzy. V tomto případě počítáme s tím, že potřebná dodaná energie se rovná Gibbsově volné energii. Tento průběh nazýváme endotermický. [17]

$$E_{rov} = \frac{\Delta G_{298 K}}{2 * F} = \frac{237 100}{2 * 96 487} = 1,229 V \quad (2.7)$$

**Termoneutrální napětí  $E_{tn}$  [V]** je napětí při kterém je energie dodávaná elektrickým zdrojem rovna entalpii  $\Delta H$ . Veškerou potřebnou energii (Gibbsovu i tepelnou) dodává elektrický zdroj. [17]

$$E_{tn} = \frac{\Delta H_{298 K}}{2 * F} = \frac{285 830}{2 * 96 487} = 1,481 V \quad (2.8)$$

Toto je stav, který by nastal jen v ideálním případě a znamenal by, že veškerá elektrická energie je využita se 100 % účinností na rozklad vody. V praxi, za běžných podmínek je však

nutné překonat ještě **aktivační napětí elektrod**  $E_{akt}$  [V] a odpory vznikající v průběhu elektrolýzy. [17] Celkové napětí je potom dáno vztahem:

$$E_{pr} = E_{tn} + E_{akt} + I * \sum R \quad (2.9)$$

Hodnota tohoto pracovního napětí je přibližně 1,6 – 2,5 V. [1]

Tabulka 3 Průběh elektrolýzy při různém napětí [17]

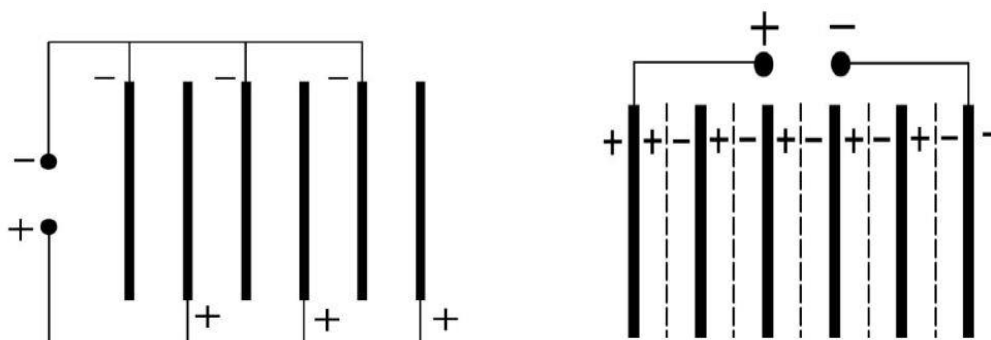
Pracovní napětí $E_{pr}$ [V]:		Tepelný proces rozkladu:	Elektrická účinnost:	Poznámka:
$E_{pr} < E_{rov}$	$E_{pr} < 1,23$	Neprobíhá	-	Napětí je nedostatečné
$E_{rov} < E_{pr} < E_{tn}$	$1,23 < E_{pr} < 1,48$	Endotermický	100-120 %	Teplo na rozklad je dodané okolím
$E_{pr} = E_{tn}$	$E_{pr} = 1,48$	Izotermický	100 %	Veškeré teplo dodané el. zdrojem je využité
$E_{pr} = E > E_{tn}$	$E_{pr} = E > 1,48$	Exotermický	Do 100 %	Teplo na rozklad je dodané el. zdrojem

## 2.2. Elektrolýzér

Elektrolýzér je zařízení, ve kterém elektrolýza probíhá. Skládá se z nádoby, elektrolytu, který může být tekutý, ale i pevný a elektrod. Původní konstrukce používala jen dvou elektrod, katody a anody. S potřebou produkovat větší množství vodíku však narůstá i potřebná aktivní plocha, proto se začaly přidávat další elektrody. V současnosti máme k dispozici tři konstrukce elektrolýzérů, alkalický, PEM a vysokoteplotní. [16]

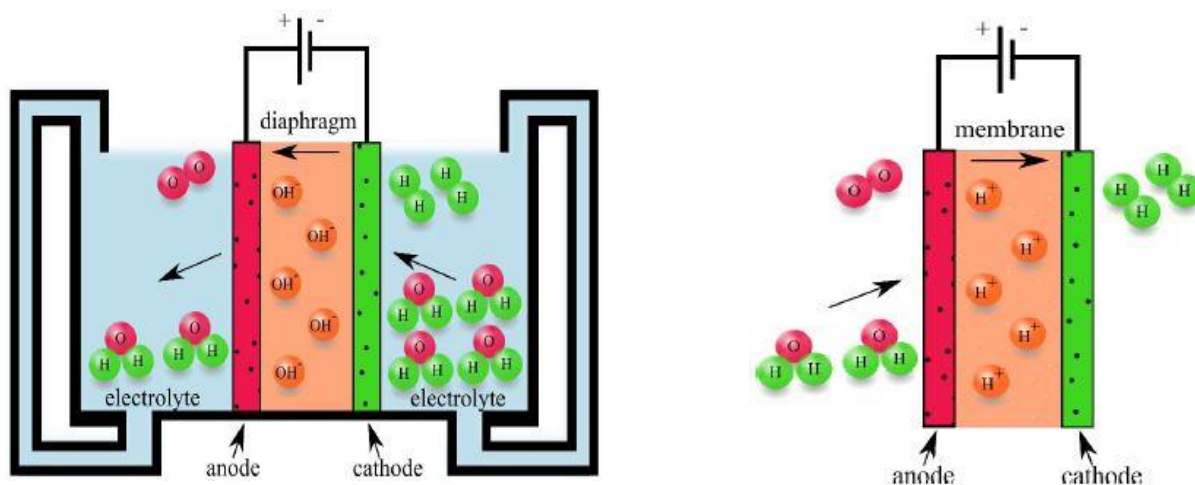
**Alkalická elektrolýza** je nejstarší a nejjednodušší způsob elektrolýzy vody. V principu jde jen o elektrody ponořené do vodného roztoku elektrolytu, nejčastěji KOH nebo NaOH. K oddělení vznikajících plynů se používá polopropustná membrána.

U alkalických elektrolýzérů rozlišujeme monopolární, nebo bipolární zapojení. Monopolární zapojení znamená, každou elektrodu připojíme jako katodu, resp. anodu. Při bipolárním zapojení zapojujeme jen krajní elektrody, napětí se rozdělí na elektrody mezi nimi a ty se stávají bipolární. Často se používá i kombinace těchto zapojení. [18]



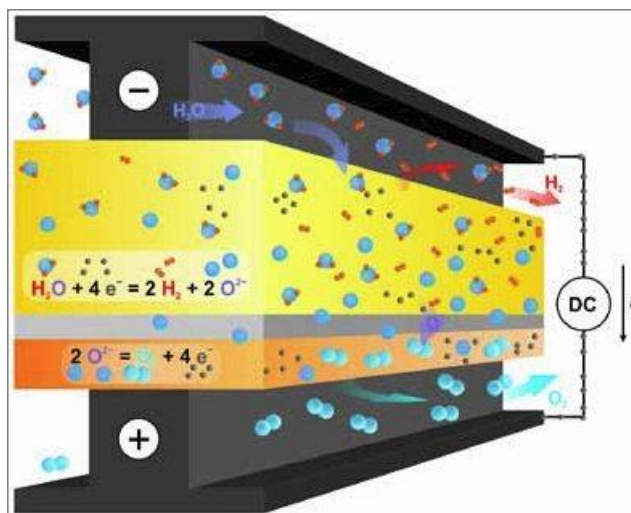
Obr. 8 Monopolární (vlevo) a bipolární (vpravo) zapojení elektrolýzéro [17]

**PEM Elektrolyzér** využívá pevný elektrolyt s protonově výměnnou membránu (Proton Exchange Membrane, dále jen PEM). Oproti alkalické elektrolýze se voda přivádí jen na anodu, kde se voda rozpadá na  $H^+$  (protony) a  $OH^-$ . PEM, která je propustná jen pro protony, odvádí  $H^+$  ionty od anody ke katodě, kde přijímají elektron a spojují se do molekul  $H_2$ . [19]



Obr. 9 Schéma alkalického (vlevo) a PEM elektrolyzéro (vpravo) [19]  
(Diaphragm – diafragma; electrolyte – elektrolyt; anode – anoda; cathode – katoda; membrane – membrána.)

**Vysokoteplotní, nebo také parní, elektrolýza** probíhá při teplotách 600 - 1000 °C což umožňuje dodávat část energie potřebné na rozklad vody ve formě tepla (viz kapitola 3.1.). Na vstupu se používá směs páry s přibližně 10 % vodíku (vodík udržuje reduktivní prostředí na katodě). Na výstupu je obohacená směs s asi 90 % hm. vodíku. [10] Používá se elektrolyt na bázi keramiky, který plní i funkci separátoru (průchozí pouze pro ionty kyslíku). [20]



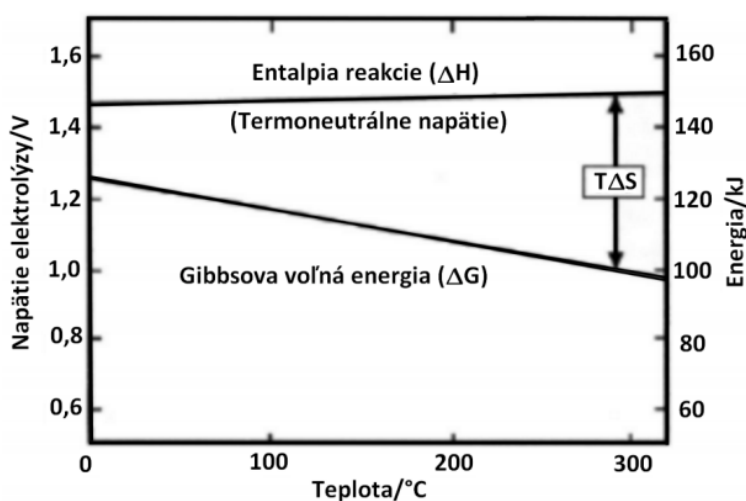
Obr. 10 Vysokoteplotní elektrolýza [20]

### 3. Faktory ovlivňující účinnost elektrolýzy

Je mnoho směrů, kterými se dá vydat za zvýšením účinnosti elektrolýzy. Mezi faktory ovlivňující účinnost elektrolýzy patří například teplota, tlak, vzdálenost elektrod a pulzující napětí. [17] Avšak není důležité jen najít optima pro samostatné faktory, ale především jde o jejich nejvhodnější kombinaci.

#### 3.1. Teplota

Jak už bylo zmíněno u vysokoteplotní elektrolýzy, při vyšších teplotách lze dosahovat vyšší elektrické účinnosti. To je způsobeno rostoucí pracovní teplotou, se kterou se snižuje  $\Delta G$  (tzn. rovnovážné napětí), přičemž  $\Delta H$  (tzn. termoneutrální napětí) zůstává téměř neměnné. [1]

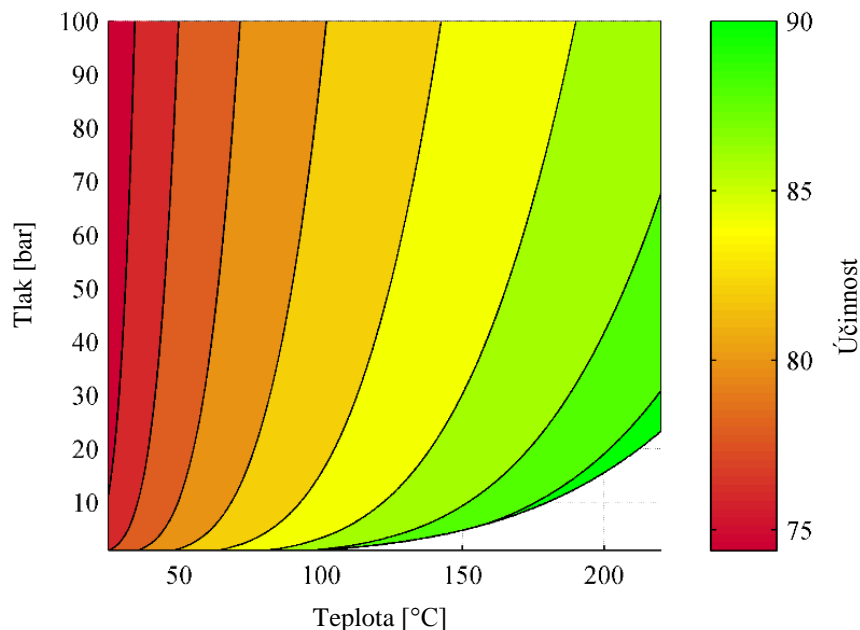


Obr. 11 Vztahy mezi rozkladným napětím, entalpií a Gibbsovou volnou energií [17]

Z grafu (obr. 11) je zřejmé, že při vysokých teplotách je rozdíl mezi  $\Delta G$  a  $\Delta H$  tak velký, že je možné, aby elektrolýzér pracoval endotermicky. Při přechodu do parní fáze navíc klesají  $\Delta H$  a  $\Delta G$  o hodnotu skupenského tepla, což také snižuje elektrickou náročnost procesu. [1] Teplo je méně ušlechtilá forma energie získávaná s větší účinností než elektrická energie, a proto je možné dosáhnout celkové účinnosti výroby vodíku až 45 %. [22]

#### 3.2. Tlak

Tlak ovlivňuje proces především dvěma způsoby. S nárůstem tlaku stoupá hodnota rozkladného napětí (je třeba více energie na vznik plynu) a tím klesá účinnost. Zároveň však snižuje odporové ztráty v elektrolytu způsobené přítomností bublinek plynu. Stejně množství plynu zabírá při vyšším tlaku menší objem. [17, 23]



Obr. 12 Účinnost alkalické elektrolýzy při různé teplotě a tlaku [23]

### 3.3. Vzdálenost elektrod

Vzdálenost elektrod ovlivňuje odpor v elektrolýzéro, čím jsou elektrody blíže, tím je odpor menší. Avšak při příliš malé vzdálenosti vznikající plyn vyplní celý prostor a tím odpor zase zvýší. V praxi se používá vzdálenost od 0,8 do 3 mm. [24]

### 3.4. Aktivní plocha elektrod

Plocha elektrod je daná konstrukcí elektrolýzéro, aktivní je však jen ta část, která je v bezprostředním kontaktu s elektrolytem a může tak na ní vznikat vodík. Přestože elektrody bývají cele ponořené, v průběhu elektrolýzy malé bublinky vznikajících plynů ulpívají na povrchu elektrod a aktivní plochu tak zmenšují. Pro odstranění bublinek a snížení odporu se v praxi osvědčila cirkulace elektrolytu, který bublinky z elektrod strhává. [24]

### 3.5. Napětí na článku

Elektrickou účinnost elektrolýzy spočteme jako podíl termoneutrálního napětí ( $E_{tn}$ ) a skutečného pracovního napětí ( $E_{pr}$ ) mezi dvěma elektrodami.

$$\eta_{el} = \frac{E_{tn}}{E_{pr}} \quad (3.1)$$

Z této rovnice vyplývá, že čím nižší je napětí na dvou sousedních elektrodách, tím větší je účinnost. Přestože je tedy nejvyšší účinnost při  $E_{pr} = 1,48$  V ( $E_{tn}$ ), v praxi je potřebné k překonání odporu elektrolytu napětí okolo 2 V. S nárůstem napětí také dochází k efektivnějšímu štěpení molekul vody. [17, 25]

### 3.6. Pulzující napětí

Vlivem jednosměrného pulzujícího proudu (anglicky Pulsed Direct Current, dále jen PDC) na elektrolýzu se začali zabývat Ghoroghchian a Bockris už v roce 1984. Objevili, že po uplynutí

času elektrického impulzu zůstává na elektrodách napětí a produkce vodíku částečně pokračuje, přestože elektrický zdroj je v dané chvíli odpojený. Ukázalo se, že množství vyprodukovaného vodíku bylo vyšší než při spotřebování stejného množství energie při konstantním proudu. [26]

### **Elektrická dvojvrstva**

Po přivedení napětí na elektrody dochází na rozhraní elektrod a elektrolytu ke zformování elektrické difúzní dvojvrstvy. To se děje z důvodu polarizace elektrod a přítomnosti aktivních iontů  $H^+$  a  $OH^-$ . Tato vlastnost způsobuje kapacitorový charakter elektrolýzéry. Okamžitě po odpojení elektrod od zdroje napětí je možné na nich naměřit napětí opačné polarity. Vzniklá vrstva má určitý elektrický potenciál což znamená, že pracovní napětí musí být o tento potenciál vyšší (viz elektrolýza) [27] Při použití ultrakrátkých pulzů, 300 ns, se tato vrstva nestačí zformovat a je tak možné efektivněji využít vyšší elektrické napětí a proud. [28]

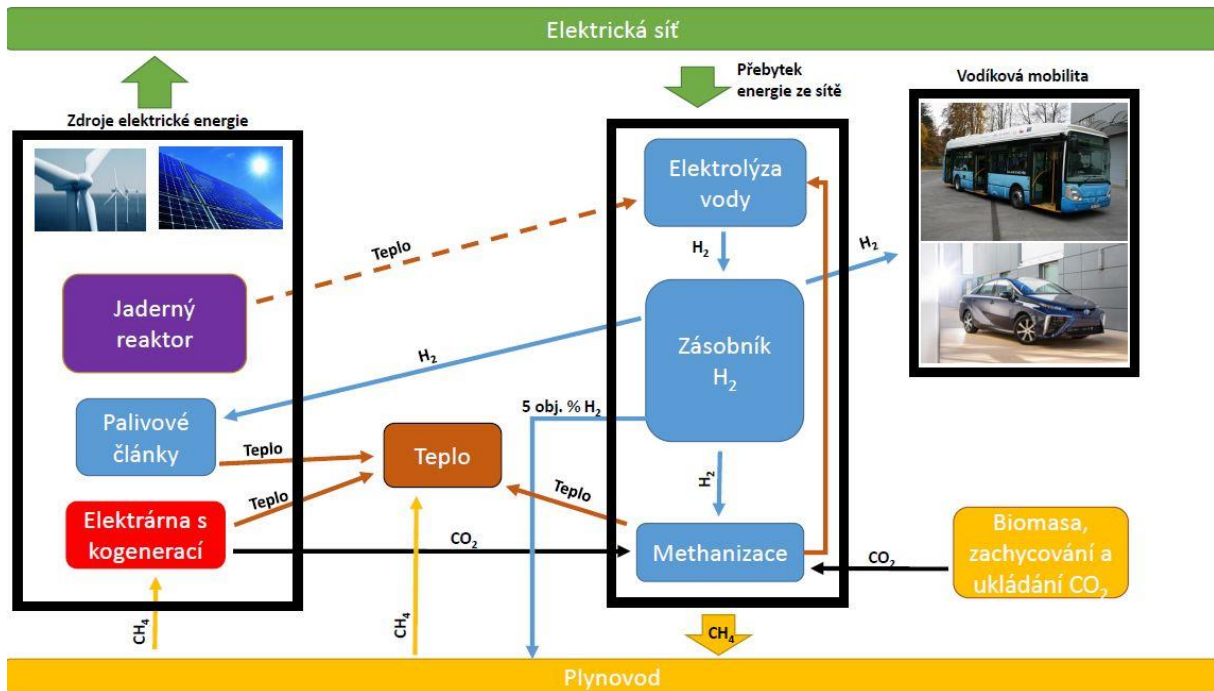
### **RLC obvod a rezonance**

Elektrolýzér se po zapojení chová jako odpor a kondenzátor zároveň. Přidáním cívky, např. ve formě transformátoru, získáme RLC obvod, u kterého je spolu se zavedením elektrických pulzů možné dosáhnout rezonance. Elektrickou impedanci elektrolýzéry zkoumali v roce 2012 Mazloomi a spol. a zjistili, že spotřeba energie byla při rezonanci vyvolané elektrickými pulzy až o 15 % nižší než při použití konstantního proudu. [29]



## 4. Power-to-Gas systém s využitím alkalické PDC elektrolýzy

### 4.1. Power-to-Gas technologie

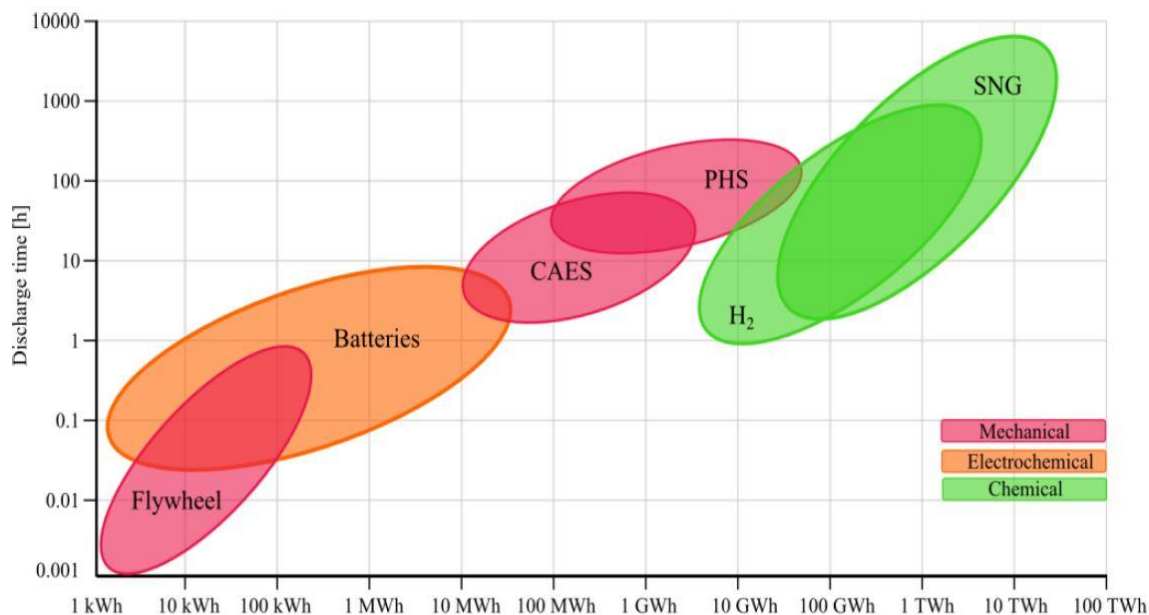


Obr. 13 Schéma Power-to-Gas systému [30]

S rostoucím podílem obnovitelných zdrojů v elektrizační síti (hlavně solární a větrná energie) se stala otázka akumulace elektrické energie nevyhnutelnou. Cílem je co nejefektivněji využít potenciál těchto zdrojů a zároveň dosáhnout rovnováhy v elektrizační soustavě. Power-to-Gas systém je technologie ukládání elektrické energie do plynu, hlavně do vodíku a metanu. Vyrobený plyn je možné v případě potřeby převést pomocí palivových článků zpět na elektrickou energii, využít v dopravě nebo přidávat do zemního plynu. [31]

Přestože se nabízí mnoho možností jak elektrickou energii ukládat (setrvačníky, baterie, přečerpávací elektrárny...) Žádná z těchto metod není schopna pojmout tak velké množství energie a po tak dlouhý čas jako jsme schopni uchovat ve vodíku (popřípadě metanu). Viz obrázek 14.

Klíčovou rolí v tomto systému hraje elektrolýza, a to jak PEM, tak i alkalická. Výhodou PEM elektrolýzy je dynamičnost v průběhu zatížení a rychlá výkonnostní odezva. Tyto elektrolýzery zároveň dokáží pracovat při vysoké proudové hustotě a dosahují vyšších napěťových účinností. Proto se jeví jako ideální řešení pro akumulaci fluktuujícího výkonu obnovitelných zdrojů. Avšak jejich nedostatkem je vysoká cena, nízká životnost a poměrně nízké výkony. Alkalické elektrolýzy jsou levnější, jednodušší a vhodné pro vysoké výkony. Jejich nevýhodou pro uplatnění v Power-to-Gas systémech je špatná dynamika a neschopnost reagovat na variabilitu příkonu. [33]



Obr. 14 Možnosti akumulace elektrické energie převedením na jiný typ energie [32]  
(Discharge time – čas vybíjení, Flywheel – setrvačnick, Batteries – baterie, CAES (Compressed Air Energy Storage) – Energie stlačeného vzduchu, PHS (Pumped hydro storage) - přečerpávací elektrárna, SNG (Synthetic Natural Gas) – syntetický metan, Mechanical – mechanická, Electrochemical – elektrochemická, Chemical – chemická)

Tabulka 4 Porovnání alkalické a PEM elektrolýzy [33]

Typ	ALKALICKÝ	PEM
Využití	komerční	komerční do 300 kW
Proudová hustota	0,2 - 0,4 A/cm <sup>2</sup>	1.0–2.0 A/cm <sup>2</sup>
Plocha elektrod	< 4 m <sup>2</sup>	< 0.3 m <sup>2</sup>
Výstupní tlak	0,05 - 30 bar	10 - 30 bar
Pracovní teplota	60 - 80 °C	50 - 80 °C
Minimální zatížení	20 - 40 % + něco	5 - 10 %
Maximální zatížení (v % nominálního zatížení)	< 150 %	< 200 %
Náběh z minimálního na maximální zatížení (% max. zatížení/s)	0,13 - 10 %	10–100 %
Čas náběhu ze studena na minimální zatížení	20 min - hodiny	5 - 15 min
Čistota vodíku	99,5 - 99,9998 %	99.9 - 99.9999 %
Účinnost	68 - 77 %	62 - 77 %
Cena za jednotku energie	1,0 - 1,2 €/W	1.9 - 2.3 €/W
Výkon	0.25–760 Nm <sup>3</sup> /h 1.8–5300 kW	0.01–240 Nm <sup>3</sup> /h 0.2 - 1150 kW 0.2–1150 kW
Životnost	60 000–90 000 h	20 000–90 000 h některé zdroje uvádí < 20 000 h

## 4.2. Regulace alkalického elektrolyzéro

Změny počasí a tím i výkon větrných a slunečních elektráren jsou rychlé a těžce předpověditelné. Aby bylo možné využívat alkalické elektrolyzéry v Power-to-Gas systémech je nutné, aby byly schopné reagovat na fluktuující příkon, tzn. výkon obnovitelných zdrojů.

Elektrický výkon ve stejnosměrném obvodu s konstantním napětím spočítáme jako součin napětí a proudu.

$$P = U * I \quad (4.1)$$

Příčemž napětí a proud jsou ještě svázány Ohmovým zákonem.

$$I = \frac{U}{R} \quad (4.2)$$

Chceme-li tedy měnit (regulovat) výkon, je možné měnit napětí, proud nebo odpor. Protože však je nutné dělat tyto změny v průběhu elektrolýzy, jsou možnosti značně omezené. Ovlivnitelný je především tlak a rychlost cirkulace elektrolytu. Změny tlaku ovlivňují rovnovážné napětí (viz kapitola 3.2) a tím protékající proud. A rychlost proudění elektrolytu ovlivňuje aktivní plochu elektrod, tzn. odpor (viz kapitola 3.4). Avšak tato regulace je jen nepříma, a navíc značně ovlivňuje účinnost.

Další možností, jak reagovat na změnu příkonu, je připojovat či odpojovat články elektrolyzéro, případně aktivovat, deaktivovat další vyvíječe. Ale ani toto řešení není ideální, protože představuje složitou konstrukci.

## 4.3. PDC regulace

Jak už bylo zmíněno výše (kapitola 3.5), jednosměrný pulzující proud PDC má pozitivní vliv na zvyšování účinnosti elektrolýzy, ale především přináší myšlenku přímé regulace výkonu alkalického elektrolyzéro.

Vzhledem k účinnosti by bylo dobré najít ideální nastavení tlaku, rychlosti cirkulace elektrolytu (resp. odporu) a dalších faktorů a následně je již neměnit. Bude-li tedy odpor v průběhu elektrolýzy konstantní, z Ohmova zákona vyplývá, že musí být konstantní podíl napětí a proudu.

$$R = konst. \Rightarrow \frac{U}{I} = konst. \quad (4.3)$$

A protože rozkladné napětí je dáno, je dán i protékající proud, a tedy i potřebný příkon.

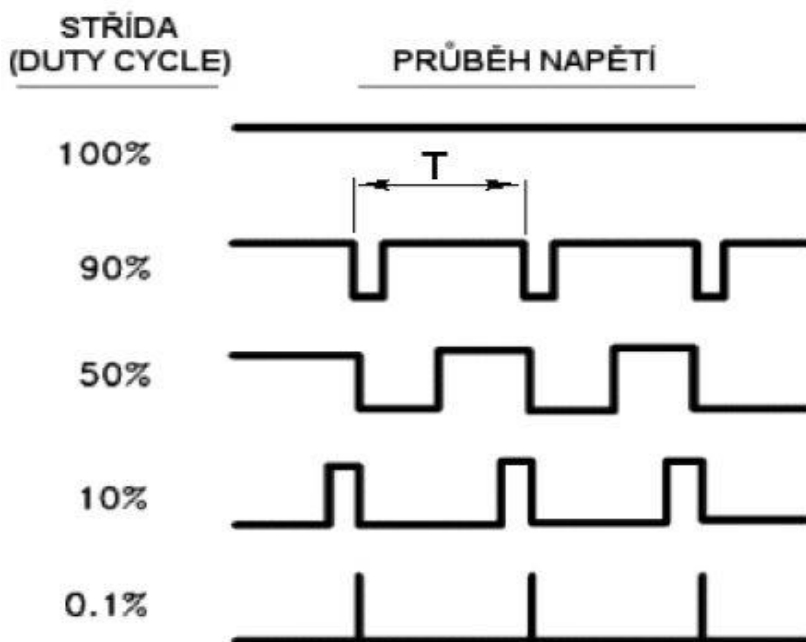
$$P = U * I = konst. \quad (4.4)$$

Z toho vyplývá, že elektrolyzéro je neregulovatelný a jediná možná regulace je připojování a odpojování dalších jednotek.

Zavedení elektrických pulzů znamená, že máme dostatečné napětí a proud (v čase pulzu), tzn. elektrolýza probíhá, ale ne po celý čas (v čase přestávky jsou dodávané napětí a proud nulové). Abychom mohli vypočítat výkon při pulzech je potřeba výsledné napětí zintegrovat nebo ho nahradit ekvivalentním napětím. Například, ukládáme-li energii Power-to-Gas systémem a změní se přebytek v elektrické síti ze 100 W na 200 W je nutné připojit další

elektrolyzér s výkonem 100 W anebo použijeme elektrolyzér s výkonem 400 W a změním střídu pulzu z 25 na 50 %.

Elektrolýza tedy může probíhat i při nižším ekvivalentním napětí, než je napětí potřebné na rozklad vody a je tedy možné používat jeden elektrolyzér v kombinaci s různými příkony.



Obr. 15 Různé šířky pulzu při dané frekvenci [36]

## 5. Experiment: PDC regulace alkalického elektrolyzéro

Cílem experimentu je prokázání teorie, popsané v předchozí kapitole (4.3), při praktickém měření. To, že je cílem pouze prokázání, že zavedením PDC je možné regulovat alkalický elektrolyzér, nám značně zjednodušuje práci. Stačí prokázat, že elektrolýza bude probíhat i když ekvivalentní napětí na článku bude nižší než minimální napětí potřebné pro rozklad vody. Nicméně pro použitelnost této regulace v Power-to-Gas systémech je nutné, aby byla v průběhu regulace zachována dostatečná účinnost.

**Hypotéza:** *Zavedením PDC a změnou šířky pulzu je možné regulovat alkalický elektrolyzér v celé šíři jeho výkonu, a to při zachování dostatečné účinnosti.*

### 5.1. Předpoklady měření

Elektrolýzu vody ovlivňuje mnoho faktorů. Některé se dokonce v průběhu měření mění, a tak ovlivňují výsledky. Abychom tedy mohli s naměřenými hodnotami dále pracovat a vytvářet závěry, je nutné zavést předpoklady měření.

#### Předpoklady v průběhu celého měření:

1. Napětí dodávané do elektrolyzéro je buďto maximální (v čase pulzu), nebo nulové (v čase přestávky).
2. Dodávaný proud je v čase pulzu maximální pro dané nastavení a v čase přestávky nulový.
3. Odpor v obvodu se nemění.
4. Frekvence pulzů je konstantní.
5. Koncentrace elektrolytu a jeho teplota se nemění.
6. Plyn vstupující do odměrného válce obsahuje jen HHO směs v poměru H:O 2:1 a má normální teplotu.
7. Tlak plynu v odměrném válci je atmosférický.
8. Na vznik jednoho molu vodíku dodá elektrický zdroj energii  $\Delta H = 285.83$  kJ.

### 5.2. Měřicí trať

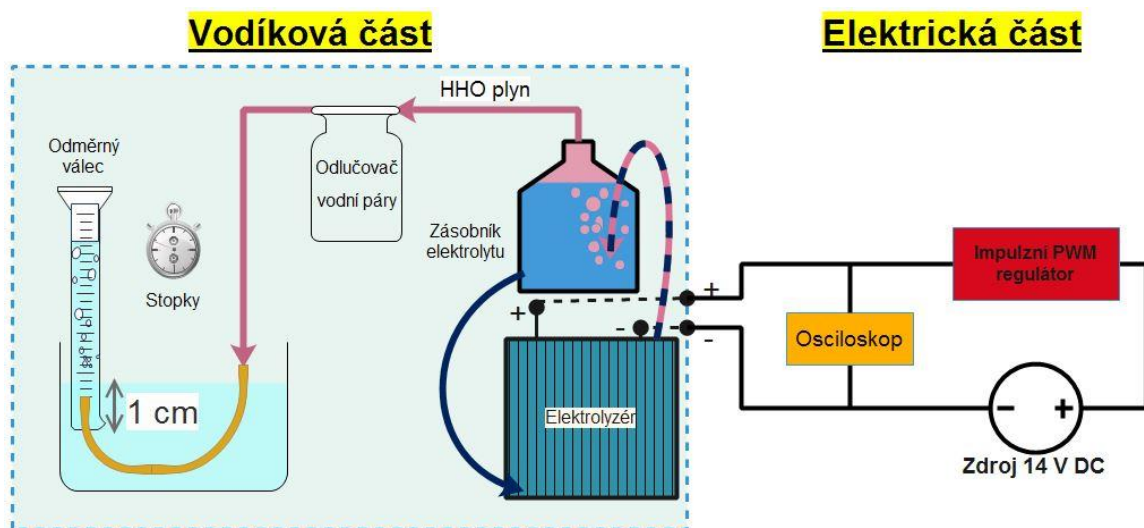
Měřicí trať se skládá z elektrické a vodíkové části. Elektrická část zahrnuje zdroj elektrické energie a pulzní generátor. Vodíková část obsahuje elektrolyzér, čištění a vysoušení HHO plynu a zařízení na měření průtoku.

#### Elektrická část:

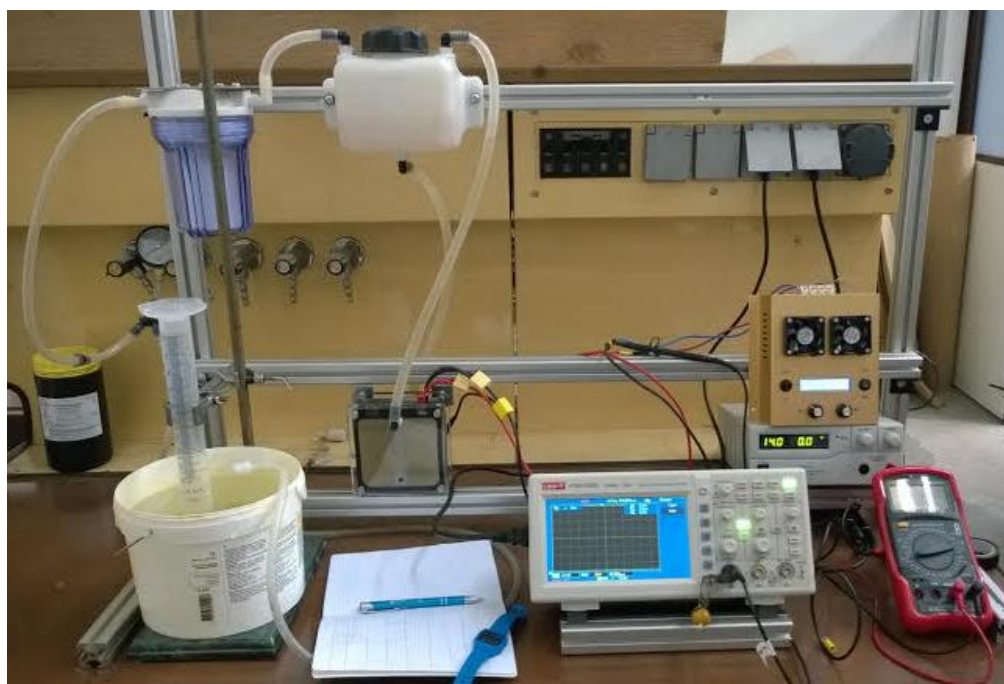
- **zdroj energie** – laboratorní zdroj
- **pulzní generátor** – automatický PWM regulátor proudu
- **elektrické vodiče** – kvůli velkým proudům zde vznikají znatelné ztráty
- **osciloskop** – zaznamenávání průběhu pulzů.

### Vodíková část:

- Elektrolyzátor;
- zásobník elektrolytu – také se zde probubláváním odlučuje vzniklá HHO směs od elektrolytu;
- odlučovač vodní páry;
- jednocestný ventil;
- tlakoměr;
- pojistka proti zpětnému prošlehnutí plamene;
- nádržka s vodnou a odměrný válec na měření průtoku;
- vše je spojeno silikonovými hadičkami.



Obr. 16 Schéma měřicí tratě



Obr. 17 Praktické provedení experimentu

### 5.3. Použité přístroje a měřící aparatura

**Laboratorní zdroj** *Manson HSC-3600*. Dodává napětí v rozsahu 1–16 V a proud 0–60 A. Krok regulace napětí a proudu 0,1 V resp. 0,1 A.

**Pulzní generátor** *Luxury Gold V4.1*. Maximální proud: 75 A. Frekvenční rozsah: 10 Hz – 30 KHz. Zařízení pomocí PWM modulace automaticky reguluje nastavený proud při dané frekvenci. [34]

**HHO generátor** *DCB312*. Alkalický elektrolyzátor pro vývoj HHO plynu (bez separační membrány). 16 elektrod s celkovou aktivní plochou 1076 cm<sup>2</sup>. Vzdálenost elektrod je daná těsněním tloušťky 2 mm. Testováno na přetlak 200 kPa. Zapojení bipolární (smíšené) (+)nnnn(-)nnnn(+)nnnn(-) + katoda, - anoda, n bipolární elektroda. [35]

**Odměrný válec** s objemem 100 ml a výškou 25 cm.

**Osciloskop** *UNI-T, UTD2102CEL*. Dvoukanálový digitální osciloskop s šířkou pásma 100 MHz a vzorkovací frekvencí 1 GS/s.

**Digitální multimetr** *UNI-T UT55*.

**Stopky** – digitální hodinky.

### 5.4. Postup měření

Z důvodu výbušnosti vodíko-kyslíkové směsi jsme měření prováděli v dostatečně velké a odvětrávané hale, vodík se tak rozptýlí rychleji než dojde ke kritické koncentraci a výbuchu.

Jak vyplývá z kapitoly 3. účinnost elektrolýzy je závislá na frekvenci ( $f$ ) a koncentraci ( $w$ ) elektrolytu. Optimální nastavení by vyžadovalo samostatný výzkum, proto jsme tyto hodnoty zvolili:

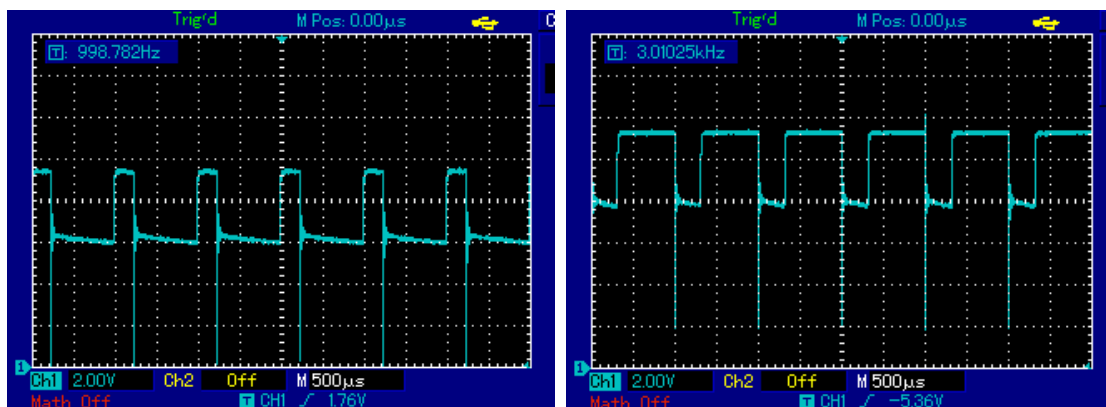
$$f = 1 \text{ kHz}$$

$$w = 0.53 \text{ hm. \%}$$

Před měřením jsme vždy nastavili předem zvolené podmínky, počkali jsme, až se elektrolyzátor zaběhne (ustálí) a změřili jsme požadované veličiny. Napětí a proud jsme odečítali přímo z digitálního displeje laboratorního zdroje. Průtok HHO směsi jsme měřili zvonovou metodou. Tzn. měřili jsme čas, za který vznikne dané množství plynu.

Měřené veličiny tedy jsou: napětí, proud a čas. První měření jsme opakovali 12x, a protože byl průběh stabilní, snížili jsme počet opakování při následujících měřeních na 6 až 7 opakování.

Měření jsme začali vynecháním pulzního generátoru a připojením elektrolyzátoru přímo k elektrickému zdroji. Takto jsme změřili napětí, proud a čas při konstantním napětí (tedy s objemem pulzu 100 %) a tedy hodnoty, při kterých tento elektrolyzátor s danou koncentrací elektrolytu je schopný pracovat. Následovalo zapojení pulzního generátoru a zvyšováním proudu (příkonu) jsme postupně změřili průtok HHO plynu pro objem pulzu 19, 31, 51, 72 a 84 %.



Obr. 18 Záznam průběhu elektrických impulzů na osciloskopu, objem pulzu 18 % (vlevo) a 72 % (vpravo)

### Pozn.: Zvonová metoda

Jde o metodu měření průtoku, při které se do nádoby naplněné vodou a ponořené pod hladinu dnem vzhůru přivádí plyn. Plyn vytlačuje kapalinu a hladina v nádobě tak klesá. Měří se čas, za který plyn vytlačí daný objem vody. Tlak plynu však bude v nádobě vyšší o hydrostatický tlak, který je závislý na hloubce ponoření. [17]

V našem případě při hloubce ponoření  $h = 1$  cm a teplotě vody  $20$  °C vypočítáme hydrostatický tlak ( $p$ ) jako součin hustoty ( $\rho$ ) gravitačního zrychlení ( $g$ ) a hloubky ponoření ( $h$ ):

$$p = \rho * g * h = 998,2 * 9,81 * 0,01 = 98 \text{ Pa} \quad (5.1)$$

Nicméně tato hodnota je v porovnání s atmosférickým tlakem (101 325 Pa) zanedbatelná.

## 5.5. Výsledky měření

V prvním měření jsme zjistili, že pro naši sestavu je ideální napětí zdroje 14 V ( $U_{\max}$ ) a protékající proud je přibližně 11 A ( $I_{\max}$ ). Z těchto hodnot jsme vycházeli při dalších výpočtech. Elektrický příkon ( $P$ ) jsme spočítali jako součin napětí ( $U_{\max}$ ) a proudu ( $I$ ) naměřeném na zdroji. Účinnost je spočítána jako podíl entalpie děje ( $\Delta H$ ) a energie, kterou musel zdroj dodat na vznik jednoho molu vodíku. Tabulka 5 uvádí průměry skupin měření.

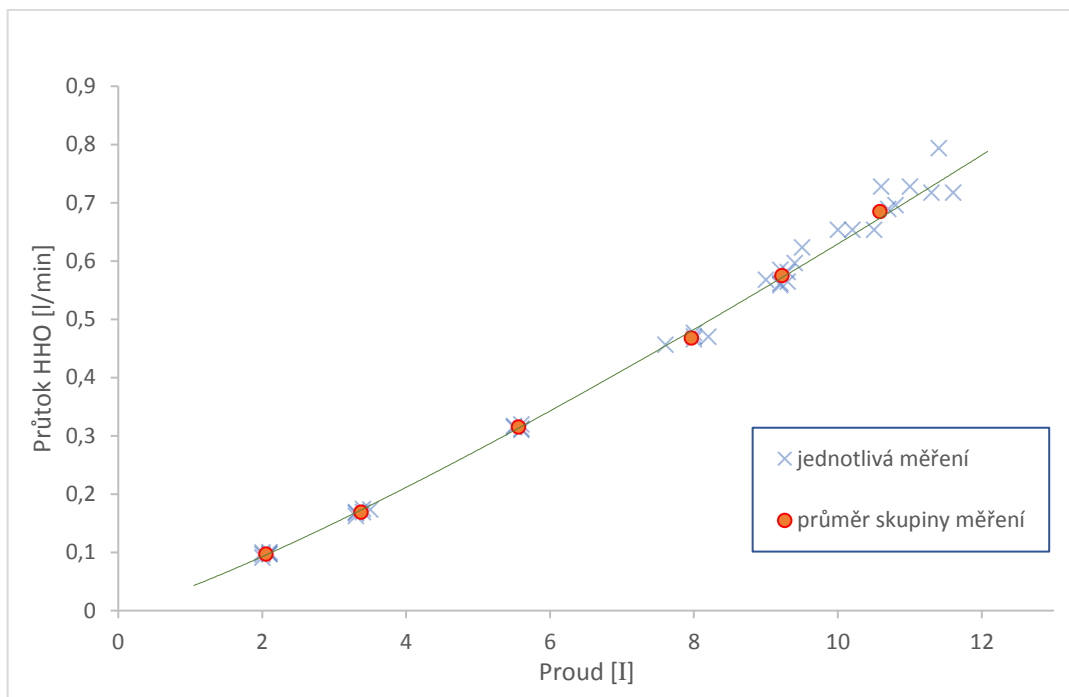
Tabulka 5 Výsledky měření

Číslo skupiny měření	Ekvivalentní napětí	Celkový proud	Šířka pulzu	Průtok HHO	Elektrický příkon	Celková účinnost
	$U_{\text{ekv}}$ [V]	$I$ [A]	[%]	[l/min]	$P$ [W]	[%]
2	2,71	2,05	19 %	0,097	28,70	40 %
3	4,46	3,37	32 %	0,169	47,13	42 %
4	7,36	5,56	53 %	0,315	77,84	48 %
5	10,54	7,96	75 %	0,468	111,44	49 %
6	12,20	9,22	87 %	0,575	129,03	52 %
1	14,00	10,58	100 %	0,685	148,05	54 %

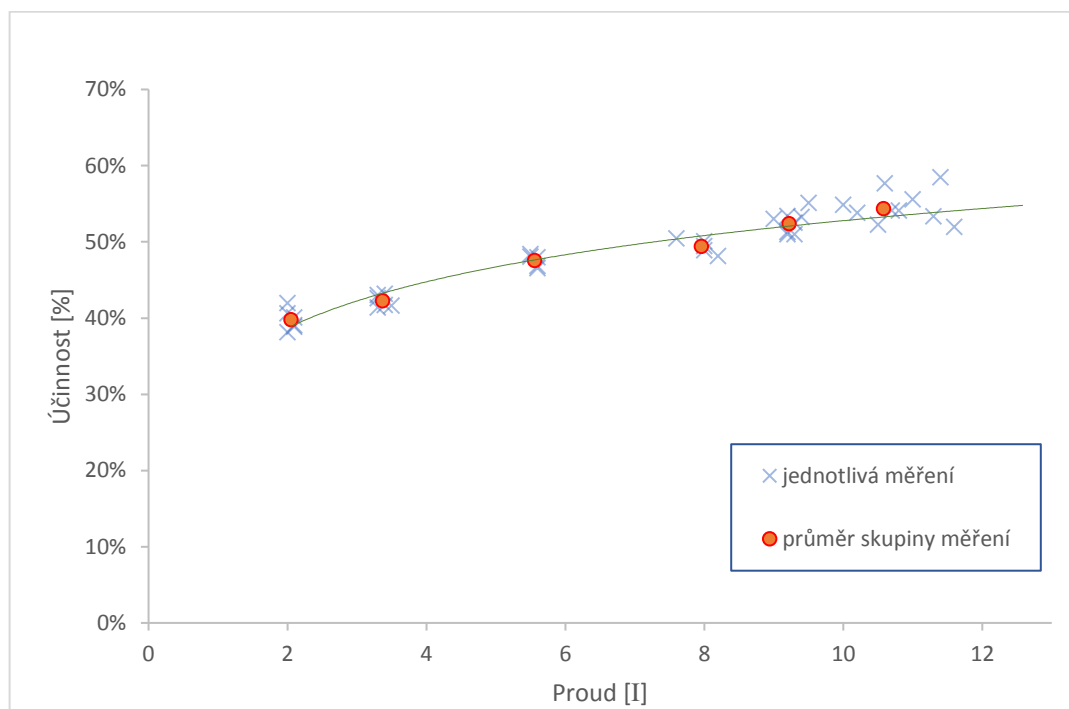


Graf na obrázku 19 ukazuje závislost průtoku (množství) HHO na dodaném proudu. Je vidět, že tato závislost je téměř lineární. Postupný nárůst směrnice je dán vyšší účinností při vyšších proudech. Tato závislost, účinnost na proudu, je vidět z grafu na obrázku 20.

Vyšší rozptyl naměřených hodnot u skupiny 6 a 1 je dán postupným nárůstem proudu během měření.



Obr. 19 Závislost průtoku HHO na dodaném proudu



Obr. 20 Závislost účinnosti na dodaném proudu

## 5.6. Zhodnocení výsledků měření

Jak je vidět z grafů, *obr. 19* a *20*, rozptyl jednotlivých opakování je velmi malý. Jeho nárůst u skupiny měření 1 a 6 byl způsoben vysokým proudem a tím zahříváním elektrolytu v průběhu měření. S nárůstem teploty elektrolytu klesal odpor, a tak narůstal proud. Tyto rozdíly jsou však tak malé, že výsledky můžeme považovat za statisticky průkazné.

Z naměřených hodnot jasně vyplývá téměř lineární závislost množství vyrobeného plynu na protékajícím proudem. A jelikož je velikost protékajícího proudu přímo úměrná šířce pulzu, můžeme prohlásit, že změnou šířky pulzu lze regulovat výkon alkalického elektrolyzéry. Účinnost sice při nižších příkonech klesá, avšak rozdíl 14 % při změně zatížení elektrolyzéry z 18 na 100 % je přijatelný.

**Měření tedy potvrzuje hypotézu.** *Zavedením PDC a změnou šířky pulzu je možné regulovat alkalický elektrolyzér v celé šíři jeho výkonu, a to při zachování dostatečné účinnosti.*

## Závěr

Vodík je pro svou nízkou hustotu a vysokou výhřevnost ideálním palivem, nicméně se volně nevyskytuje, a proto ho nelze těžit. Je však poměrně snadno vyrobitelný a může tak sloužit jako energetický vektor. Toho se využívá v Power-to-Gas systémech. Ty využívají vodík k akumulaci elektrické energie. Zpět se energie z vodíku získává především palivovým článkem. Účinnost dnešních elektrolýzérů se pohybuje kolem 60 % a palivových článků kolem 50 %. Celková účinnost při převodu elektrická energie – vodík – elektrická energie je tedy maximálně 30 %. Přestože tato účinnost je v porovnání s alternativami nízká je vodík schopen uchovat velké množství energie po dlouhý čas. Další výhodou je rychlost přečerpávání (minuty), to je podstatné především pro mobilní aplikace.

Tato práce se zvláště věnuje alkalické elektrolýze, faktorům ovlivňujícím její účinnost a jejímu efektivnímu využití v Power-to-Gas systému. Správný výběr faktorů a jejich nastavení by znamenal maximalizování účinnosti. To však vyžaduje obsáhlý výzkum. Jedním z nejzásadnějších faktorů je zavedení pulzů. To má pozitivní vliv jak na účinnost elektrolýzy, tak na regulaci výkonu alkalického elektrolýzéro. Jelikož se elektrolýzér chová jako kondenzátor a odpor, lze přidáním cívky vytvořit rezonanční obvod. Mazloomi zkoumal průběh elektrolýzy při rezonanci a popsal nárůst účinnosti, až o 15 %. [29] Tato práce popisuje teorii regulace výkonu elektrolýzy, změnou šířky pulzů a experimentálně ji ověřuje.

Alkalické elektrolýzéry jsou relativně levné, jednoduché a jsou již dlouho zavedenou technologií. Jejich budoucnost v Power-to-Gas systémech je však ohrožena, protože jsou považovány za špatně regulovatelné. Nahradit by je měli drahé, ale dobře regulovatelné PEM elektrolýzéry. Tato práce však experimentálně v laboratorních podmínkách prokázala možnost plynulé regulace alkalického elektrolýzéro použitím pulzujícího napětí a změnou objemu pulzu.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] BALAJKA, Jiří. *Vodík a jiné nové nosiče energie*. Bratislava : Alfa, 1982. 303 s.
- [2] KOSKINEN, Perttu. *The development and microbiology of bioprocesses for the production of hydrogen and ethanol by dark fermentation*. Tampere: Tampere University of Technology, 2008. ISBN 9789521520280.
- [3] SOMOLOVÁ, Markéta a Petr DLOUHÝ. Výroba vodíku. *Česká vodíková technologická platforma* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyroba-vodiku/664-vyroba-vodiku>
- [4] Výroba vodíku parním reformováním. In: *Petroleum.cz* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-43.aspx>
- [5] Výroba vodíku parciální oxidací. In: *Petroleum.cz* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-44.aspx>
- [6] *Elektrolýza vody* [online]. In: . [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://canov.jergym.cz/elektro/ellyza/h2o.html>
- [7] GUPTA, Ram B. *Hydrogen Fuel : Production, Transport, and Storage* [online]. 2009, 624 p. [cit. 2017-4-28]. Dostupné z: <[https://books.google.sk/books/about/Hydrogen\\_Fuel.html?id=UIVhpI0XnRcC&redir\\_esc=y](https://books.google.sk/books/about/Hydrogen_Fuel.html?id=UIVhpI0XnRcC&redir_esc=y)>
- [8] KAMEŠ, Josef. *Alternativní palivo - vodík*. Praha: [s.n.], 2008. ISBN 9788025416860.
- [9] JANÍK, Luděk a Petr DLOUHÝ. Transport a skladování vodíku. *Česká vodíková technologická platforma* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/618-skladovani-vodiku-i>
- [10] JANÍK, Luděk a Petr DLOUHÝ. Vodíkové hospodářství. *Česká vodíková technologická platforma* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vodikove-hospodarstvi/654-vodikove-hospodarstvi>
- [11] *Technet.cz*. In: *Technet.cz* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: [http://technet.idnes.cz/foto.aspx?foto1=VSE20b1db\\_13\\_Prurez\\_lahvi\\_plynny\\_H2.jpg](http://technet.idnes.cz/foto.aspx?foto1=VSE20b1db_13_Prurez_lahvi_plynny_H2.jpg)
- [12] DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. Využití vodíku. *Česká vodíková technologická platforma* [online]. 2007 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyuziti-vodiku/637-ucinnost>
- [13] DOUČEK, Aleš, Daniel TENKRÁB a Petr DLOUHÝ. Vodíkové hospodářství a možnosti využití vodíku k regulaci obnovitelných zdrojů energie. *Paliva* [online]. 2011, roč. 3, č. 1, 1 -7 [cit. 2014 -05 - 11]. Dostupné z: <http://paliva.vscht.cz/download.php?id=3>
- [14] SØRENSEN, Bent. *Hydrogen and fuel cells: emerging technologies and applications*. 2nd ed. Oxford: Academic Press, 2012. ISBN 0123877091

- [15] DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. Palivové články. *Česká vodíková technologická platforma* [online]. 2007 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cs/clanky/kategorie-clanku/clanky/587-palivove-clanky>
- [16] KAMEŠ, Josef. Alternativní palivo - vodík. Praha: [s.n.], 2008. ISBN 978-80-254-1686-0.
- [17] POLÁČEK, J. Pulzní generování vodíku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 59 s. Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
- [18] LeROY, L. R. Industrial water electrolysis: Present and future. In *International Journal of Hydrogen Energy*. [online]. 1983, vol. 8, no. 6, p. 401-417 [cit. 2017-5-4]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0360319983901623>
- [19] KOPONEN, Joonas, et al. Review of water electrolysis technologies and design of renewable hydrogen production systems. 2015. Dostupné z: [https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/104326/MScThesis\\_JKK.pdf?sequence=2](https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/104326/MScThesis_JKK.pdf?sequence=2). Master's Thesis. Lappeenranta University of Technology.
- [20] KOLMANOVÁ, Marie. Vysokoteplotní elektrolýza: „čistá“ výroba vodíku s možností zpětné konverze. In: *Technik: VĚDA, VÝZKUM, INOVACE* [online]. VŠCHT Praha: VŠCHT Praha, 2016 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: [http://www.technickytydenik.cz/rubriky/veda-inovace/vysokoteplotni-elektrolyza-cista-vyroba-vodik-u-s-moznostmi-zpetne-konverze\\_35526.html](http://www.technickytydenik.cz/rubriky/veda-inovace/vysokoteplotni-elektrolyza-cista-vyroba-vodik-u-s-moznostmi-zpetne-konverze_35526.html)
- [21] SEQUEIRA, César, A. C. – SANTOS, Diogo, M. F. Hydrogen production. In *Ciencia & Tecnologia dos Materiais* [online]. Lisboa, 2010 [cit. 2017-5-4]. Dostupné z: <http://www.scielo.oces.mctes.pt/img/revistas/ctm/v22n3-4/22n3-4a13f7.gif>
- [22] SHIN, Youngjoon, et al. Evaluation of the high temperature electrolysis of steam to produce hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32.10: 1486-1491.
- [23] LEROY, R, Bowen, C & LeRoy D 1980, “The thermodynamics of aqueous water electrolysis”, *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 127, no. 9, pp. 1954–1962.
- [24] Nagai, N., Takeuchi, M., & Nakao, M. (2003). Effects of generated bubbles between electrodes on efficiency of alkaline water electrolysis. *JSME International Journal, Series B: Fluids and Thermal Engineering*, 46(4), 549-556.
- [25] Ulleberg O. Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach. *International Journal of Hydrogen Energy* 2003; 28:21e33
- [26] VANAGS Martins et al. Water Electrolysis with Inductive Voltage Pulses. In *Institute of Solid State Physics*, University of Latvia, Riga, Latvia [online] <http://dx.doi.org/10.5772/52453>
- [27] ZHANG, Chunjuang et al. Mechanistic Studies of Water Electrolysis and Hydrogen Electro-Oxidation on High Temperature Ceria-Based Solid Oxide Electrochemical Cells. In *Journal of the American Chemical Society* [online]. 2013, 135, 11 572-11579 [cit. 2017-5-10]. Dostupné z: <http://spst.shanghaitech.edu.cn/css/Electro.pdf>

- [28] SHIMIZU, Naohiro et al. A novel method of hydrogen generation by water electrolysis using a ultrashort-pulse power supply *In Journal of Applied Electrochemistry* [online], 2006, vol. 36, no. 4 pp 419-423 Dostupné z: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10800-005-9090-y#page-1>
- [29] MAZLOOMI, Kaveh – SULAIMAN, Nasri – MOAYEDI Hossein. An Investigation into the Electrical Impedance of Water Electrolysis Cells - With a View to Saving Energy. *In International Journal of Electrochemical Science* [online]. 7 (2012) p. 3466-3481 Dostupné z: <http://www.ele-ctrochemsci.org/papers/vol7/7043466.pdf>
- [30] TKÁČ, Martin. Power-to-Gas a Mikrokogenerace. In: *Ujv.cz* [online]. Centrum výzkumu Řež s.r.o.: Centrum výzkumu Řež, 2016 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: [http://www.ujv.cz/images/pdf/seminare/Amper\\_2016/6\\_Power\\_to\\_gas\\_a\\_CHP\\_Tkac.pdf](http://www.ujv.cz/images/pdf/seminare/Amper_2016/6_Power_to_gas_a_CHP_Tkac.pdf)
- [31] Hydrogenics. *Power-to-Gas Energy Storage and Transportation* [online]. 2015 [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <http://londonresearchinternational.com/wp-content/uploads/2015/03/GTENewsletter-ENG-25-Hydrogenics.pdf>
- [32] LEROY, R, Bowen, C & LeRoy D 1980, “The thermodynamics of aqueous water electrolysis”, *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 127, no. 9, pp. 1954–1962.
- [33] KOPONEN, J. Review of water electrolysis technologies and design of renewable hydrogen production systems. Lappeenranta, 2015, 87 s.
- [34] Pro'X Luxury Gold Version 4.1 PWM Current Controller with Open Setting Function. In: [Http://www.ogohho.com](http://www.ogohho.com) [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.ogohho.com/goods/detail.do?gid=53>
- [35] Instalace HHO generátoru. In *H2shop.cz* [online] [cit. 2015-5-13]. Dostupné z: [http://www.h2shop.cz/download/instalacni\\_sada\\_HHOgeneratoru.pdf](http://www.h2shop.cz/download/instalacni_sada_HHOgeneratoru.pdf)
- [36] HANKOVEC, David. *Vývoj a výroba elektrotechniky*. [online] 2002 – 2015 [cit. 2015-5-13+]. Dostupné z: <http://www.dhservis.cz/psm.htm>