



**FAKULTA
ŠROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav konstruování a částí strojů

**Konstrukční návrh a deformační analýza
vodíkového elektrolyzéro**

**Design and deformation analysis of a
hydrogen electrolyser**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2022

Bc. Lukáš Marek

Studijní program: Dopravní a transportní technika

Studijní obor: Transportní technika

Vedoucí práce: Ing. Jan Hoidekr, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Marek** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **475056**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav konstruování a částí strojů**
Studijní program: **Dopravní a transportní technika**
Specializace: **Transportní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Konstrukční návrh a deformační analýza vodíkového elektrolyzérů

Název diplomové práce anglicky:

Design and deformation analysis of a hydrogen electrolyser

Pokyny pro vypracování:

- 1) Vysvětlíte princip produkce vodíku pomocí elektrolýzy a zpracujete rešerši průmyslových elektrolyzérů
- 2) Zpracujete vlastní konstrukční návrh vodíkového elektrolyzérů určeného pro výukové účely
- 3) Provedte deformační analýzu pomocí metody konečných prvků dvou tvarově různých řešení - kruhového a čtvercového průřezu
- 4) Vytvořte 3D model a zpracujte výrobní výkresovou dokumentaci navrženého řešení

Seznam doporučené literatury:

ŠVEC, Vladimír. Části a mechanismy strojů: spoje a části spojovací. Vyd. 3. V Praze: České vysoké učení technické, 2008, 170 s. ISBN 978-80-01-04138-3.
POSPÍCHAL, Jaroslav. Technické kreslení. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005, 84 s. ISBN 978-80-01-03214-52008.
LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření. 4., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008, xiv, 914 s. ISBN 978-80-7361-051-7.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

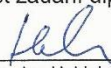
Ing. Jan Hoidekr, Ph.D. ústav konstruování a částí strojů FS


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:


Datum zadání diplomové práce: **06.04.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **03.06.2022**

Platnost zadání diplomové práce: _____


Ing. Jan Hoidekr, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


Ing. František Lopot, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

29.4.2022

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Janu Hoidekrovi, Ph.D., vedoucímu mé diplomové práce, za rady, připomínky a návrhy při konzultacích. Rovněž bych chtěl poděkovat prof. RNDr. Vladimíru Matolínovi DrSc. za konzultace týkající se vodíkových technologií a dále Ing. Martinu Dubovi, Ph.D. za rady při řešení MKP výpočtů.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: Konstrukční návrh a deformační analýza vodíkového elektrolyzéry, vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jana Hoidekra, Ph.D. s použitím literatury uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne 28. 6. 2022

Bc. Lukáš Marek

Anotační list

Jméno autora:	Bc. Lukáš Marek
Název práce:	Konstrukční návrh a deformační analýza vodíkového elektrolyzéro
Název práce v angličtině:	Design and deformation analysis of a hydrogen electrolyser
Rok zpracování	2022
Studijní program:	Dopravní a transportní technika
Ústav:	Ú 12113 Ústav konstruování a částí strojů
Vedoucí práce:	Ing. Jan Hoidekr, Ph.D.
Rozsah:	počet stran: 70 počet obrázků: 67 počet tabulek: 9 počet příloh: 14

Klíčová slova: vodík, vodíkový elektrolyzér, PEM elektrolyza, deformační analýza

Key words: hydrogen, hydrogen electrolyser, PEM electrolysis, deformation analysis

Anotace: Tato diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem edukačního elektrolyzéro. V úvodu je vysvětlen potenciál vodíkových technologií. Zároveň je zde představena činnost vodíkových elektrolyzéro. Následující kapitola představuje stávající stav techniky v oblasti vodíkových elektrolyzéro, edukačních přístrojů v oblasti vodíkových technologií. Praktická část práce se v první řadě věnuje samotnému návrhu vodíkového elektrolyzéro použitelného pro studijní potřeby. Druhá část praktické části této práce je věnována deformační analýze vodíkového elektrolyzéro. Výstupem práce je 3D model vodíkového elektrolyzéro a výrobní výkresová dokumentace vodíkového elektrolyzéro.

Abstract: This diploma thesis deals with the construction design of an educational electrolyser. In the introduction the potential of hydrogen technology is explained. At the same time, the operation of hydrogen electrolyzers is presented. The following chapter presents the state of the art in hydrogen electrolyzers, educational devices and educational devices in the field of hydrogen technology. The practical part of the thesis is primarily concerned with the actual design of a hydrogen electrolyzer that is usable for educational purposes. The second part of the practical part of this thesis is devoted to the deformation analysis of the hydrogen electrolyzer. The output of the work is a 3D model of the hydrogen electrolyzer and production drawings of the hydrogen electrolyzer.

Obsah

Seznam zkratk a symbolů	7
1. Úvod	8
1.1. Zadání	10
2. Rešerše	11
2.1. Rešerše elektrolyzérů se zaměřením na PEM elektrolyzér	11
2.2. Rešerše edukačních zařízení	18
2.3. Rešerše edukačních zařízení zabývajících se vodíkových technologií	22
3. Konstrukční návrh vodíkového elektrolyzéra	27
3.1. Volba materiálu pro koncovou desku	27
3.2. Konstrukce polykarbonátové koncové desky	28
3.3. Úprava hliníkové koncové desky	31
3.4. Konstrukce komponent pro elektroniku	32
3.5. Konstrukce komponenty pro nádrž a odlučovač	34
3.6. Výsledná podoba zařízení	36
4. Deformační analýza	37
4.1. Proces sestavení vodíkového elektrolyzéra	38
4.2. Výpočetní 3D model	41
4.3. Materiálové vlastnosti pro výpočetní model	42
4.3.1. Určení poměrné deformace	42
4.3.2. Určení napětí	42
4.4. Síťování modelu	43
4.5. Definice kontaktních parametrů	46
4.6. Definice okrajových podmínek	46
4.7. Definice zatížení	47
4.8. Výsledky deformační analýzy	48
4.8.1. Porovnání různých tvarových řešení elektrolyzérů	48
4.8.2. Porovnání průmyslového a edukačního elektrolyzéra	55
5. Voltampérová charakteristika	61
5.1. Důvod měření	61
5.2. Metody měření	61
5.3. Výsledky měření	62
5.4. Závěr měření	63
6. Závěr	64
Seznam použité literatury	65
Seznam obrázků	69
Seznam tabulek	70
Seznam příloh	70

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

Značka	Jednotka	Význam
A	$[mm^2]$	Aktuální plocha průřezu
A_0	$[mm^2]$	Počáteční plocha průřezu
c	$[J/kgK]$	Měrná tepelná kapacita vody
d	$[mm]$	Průměr hydraulického válce
E	$[MPa]$	Youngův modul pružnosti
ε	$[-]$	Skutečná (logaritmická) deformace
ϵ	$[-]$	Infinitezimální (inženýrská) deformace
F	$[N]$	Síla
f	$[-]$	Koeficient tření
l	$[mm]$	Délka tělesa
l_0	$[mm]$	Počáteční délka tělesa
Δl	$[mm]$	Přírůstek délky tělesa
m	$[kg]$	Hmotnost ohřívané vody
η	$[-]$	Účinnost ohřevu
P	$[W]$	Výkon topné patrony
p	$[kg/cm^2]$	Tlak na hydraulickém lisu
q	$[ms^{-2}]$	Tíhové zrychlení
σ	$[MPa]$	Skutečné (Cauchyho) napětí
σ_s	$[MPa]$	Smluvní (Kirchhoffovo) napětí
τ	$[s]$	Čas potřebný pro ohřev vody
Δt	$[^{\circ}K]$	Teplotní rozdíl
ν	$[-]$	Poissonův poměr
MEA		Membrane electrode assemblies
OZE		Obnovitelné zdroje energie
PEM		Proton Exchange Membrane
SOE		Solid Oxide Electrolysis

1. Úvod

Spolu s nárůstem populace a zvyšujícím se životním standardem společností poslední desetiletí stále více rezonuje téma ekologického hospodářství a energetiky. Vznikají stále vyšší požadavky na vysokou energetickou účinnost procesů při nízké uhlíkové stopě. Z vývoje posledních let je poměrně jasné, že významnou roli v tomto procesu sehrají obnovitelné zdroje – větrné, vodní či fotovoltaické elektrárny. [1] Právě fotovoltaika nabízí poměrně rozumné řešení, například v obytné zástavbě. Montáž a výroba fotovoltaických panelů je ekonomicky poměrně výhodná. Častým problémem spojeným s použitím obnovitelných zdrojů je však jejich energetická nestálost a nepředvídatelnost. Nemůžeme tedy dopředu určit kdy a kolik výkonu bude daný obnovitelný zdroj dodávat. Výše zmiňovaná fotovoltaická elektrárna použitá u obytného domku už ze svého principu vyrábí energii v době, kdy je odbyt energie relativně nízký. Vzniká nám problém, jak s energií zacházet, abychom o ni zbytečně nepřicházeli.

Chceme-li elektrickou energii použít později, je nutné ji transformovat na jinou formu energie, jelikož elektřina je sama o sobě neskladovatelná. Objekty vybavené obnovitelným zdrojem energie se tak stávají výrazně soběstačnější. Jednou z cest, jak elektrickou energii akumulovat, je využití vodíkových technologií. V daném případě přímo proces označovaný: power to gas, čili převod elektrické energie na energii obsaženou v plynu. [1] Takto vyrobený vodík označujeme jako takzvaný zelený vodík. Právě rozvoj výroby zeleného vodíku by mohl přispět k širšímu využití vodíkových technologií, jelikož nabízí levnější a ekologičtější proces, než doposud používaná výroba parním reformováním zemního plynu.

Vodík nabízí slibnou budoucnost, jedná se o prvek s vysokou energetickou hustotou 140 MJ/kg . Pro srovnání je uvedena tabulka energetických hustot ostatních prvků a sloučenin. [2]

Tabulka 1: Porovnání energetických hustot vybraných prvků

Prvek / Sloučenina	Energetická hustota [MJ/kg]
Vodík (při 690 barech a 25°C)	141,86
Methan	55,6
Zemní plyn	53,6
Benzín	46,4

Při jeho zpracování dosahují procesy dvou až třikrát vyšších účinností než klasické spalovací technologie. Zpracováním vzniká minimum škodlivého odpadu, jelikož hlavním vedlejším produktem je vodní pára, která je vypouštěna do okolí.

Pravdou zůstává, že vodíkové technologie nejsou kompletně probádanou vědní oblastí, a mohou tedy nabízet různá další uplatnění. Abychom mohli vodíkové, ale i jakékoli

jiné technologie lépe rozvíjet, je potřeba je prvně poznat a pochopit. Vhodným místem, kde je něco takového možné jsou vzdělávací instituce.

Způsob, který by mohl být použitelný právě v kombinaci s OZE v domácnostech, a kterým se budu v této práci zabývat, funguje na principu elektrolýzy vody a jejím rozpadu na vodík a kyslík pomocí protonově vodivé membrány označovanou anglickou zkratkou PEM (Proton Exchange Membrane). Cílem mé práce je vytvořit funkční zařízení, které technologii PEM elektrolýzérů představí studentům.

1.1. Zadání

Zadání bylo formulováno ve spolupráci se společností LeanCat zabývající se vodíkovými technologiemi. Zadání je inspirováno reálným požadavkem na konstrukci a následné zhotovení vodíkového elektrolyzéry, vhodného pro použití v edukačních zařízeních. Vstupní požadavky na výsledný produkt jsou následující:

- Elektrolyzér by měl být co nejvíce transparentní při zachování rozumné hodnoty účinnosti.
- Rozměry elektrolyzéry by měly odpovídat běžným studijním pomůckám
- Pro návrh použít co možná nejvíce dílu z průmyslové verze vodíkového elektrolyzéry
- Zařízení konstruovat s ohledem na možnost využít firemní 3D tiskárnu

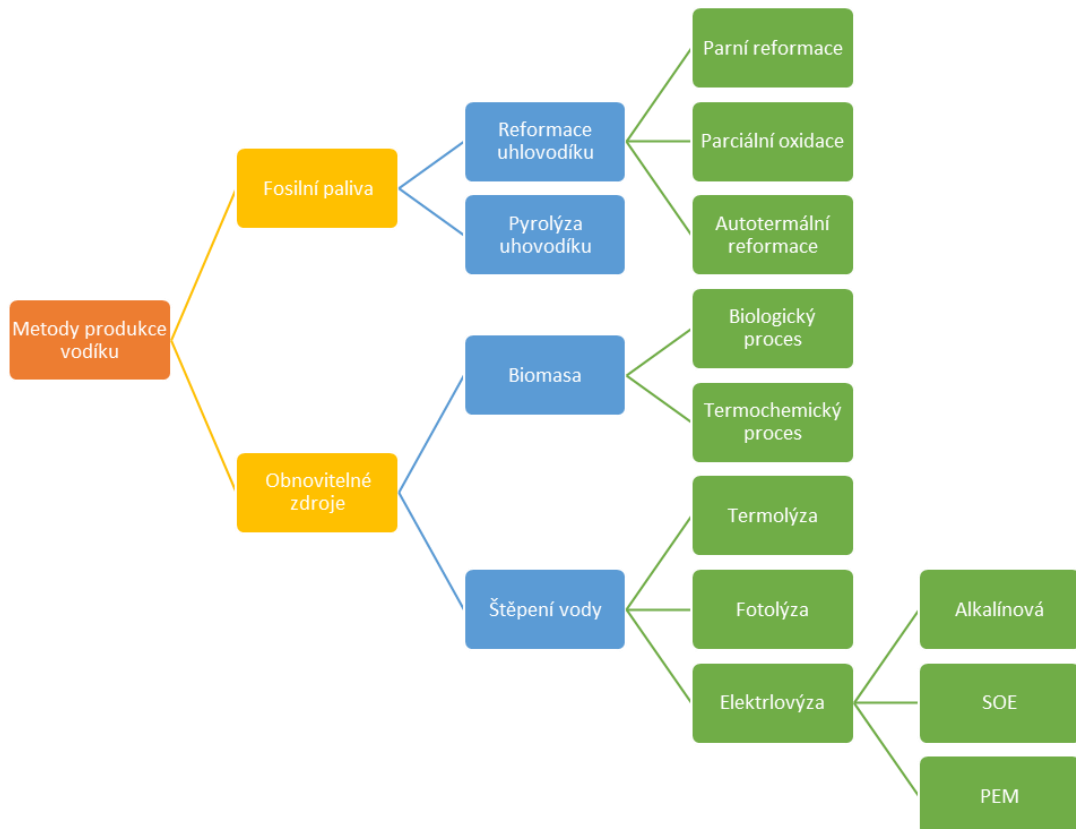
Zároveň byl z firmy vznesen požadavek na porovnání deformací čtvercového, kruhového a edukačního konstrukčního řešení.

2. Rešerše

Rešerše tématu studijního elektrolyzáru je rozdělena na tři základní aspekty. V první části jsou podrobně představeny možnosti a konstrukční zpracování elektrolyzáru se zaměřením na elektrolyzáru typu PEM. Následující část je zaměřena na obecné konstrukční principy, předpoklady a požadavky na edukační zařízení. Závěrečná část je věnována přímo výrobkům v oblasti vodíkových technologiích určených pro edukativní účely.

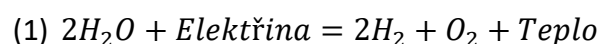
2.1. Rešerše elektrolyzáru se zaměřením na PEM elektrolyzáru

Vodík je možné vyrábět celou řadou způsobů (Obrázek 1).



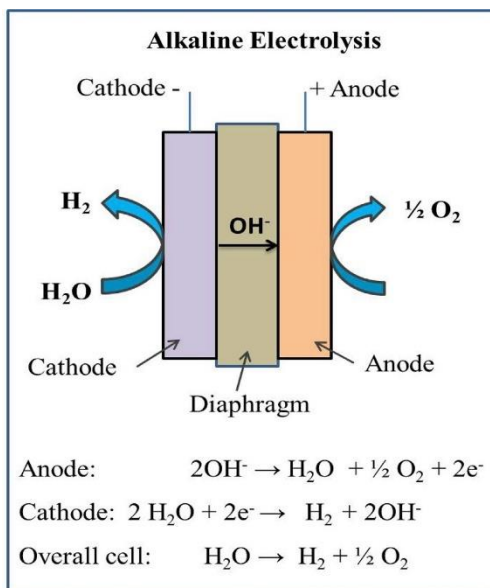
Obrázek 1: Možnosti výroby vodíku, převzato a upraveno z [1]

V případě zeleného vodíku nás zajímají technologie používající biotechnologické procesy jako například fermentace biomasy a procesy na principu štěpení vody, kam spadá i elektrolyza vody, na jejímž principu pracují všechny elektrolyzáry. Jedná se o proces, kdy stejnosměrný proud štěpí vazby v molekule vody, čímž získáváme vodík a kyslík, viz. rovnice (1).

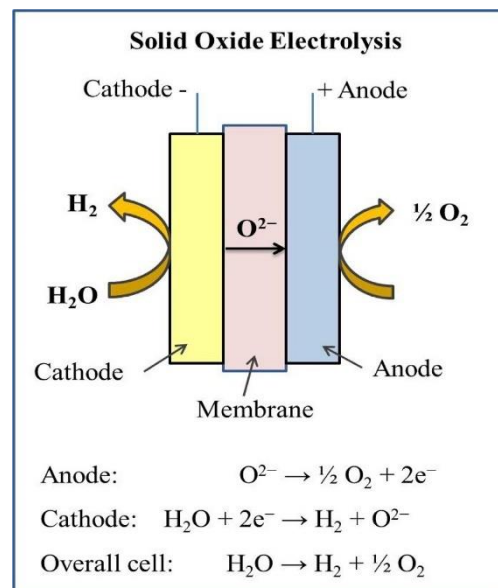


Jako první byla objevena technologie zvaná Alkaline water electrolysis neboli AWE, jejíž funkční princip je popsán na následujícím schématu (Obrázek 2). Od objevení a popsání vědci Troostwijkem a Diemannem v roce 1789 se metoda postupně stávala stále používanější pro produkci vodíku. Elektrody jsou zde odděleny membránou, která zabraňuje promíchání kyslíku a vodíku. [3] Metoda nabízí velký rozsah požadovaných výkonů. Na druhou stranu je limitována nízkou proudovou hustotou, nízkým tlakem a relativně nízkou účinností. [1] Vzhledem k nemožnosti operovat při vyšších tlacích, musí být konstrukce elektrolyzátoru poměrně rozměrná. [3]

Solid oxide electrolysis neboli SOE je rovněž naznačena na následujícím schématu. (Obrázek 3) Tato metoda produkuje velmi čistý vodík při vyšší účinnosti. [4] Proces funguje při vyšším tlaku i teplotě, a nabízí možné výhody v následných aplikacích. V současnosti je metoda problematická z pohledu zhoršené stability a degradace použitých materiálů. Díky chemické flexibilitě a vysoké aplikační teplotě je možné SOE elektrolyzátor použít při produkci oxidu uhelnatého z oxidu uheličitého. To umožňuje produkci plynu nazývaného Syngas, který se používá ve spalovacích motorech na vodík. [3]

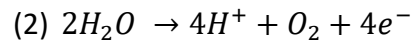


Obrázek 2: AWE schéma [1]

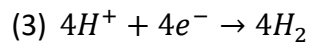


Obrázek 3: SOE schéma [1]

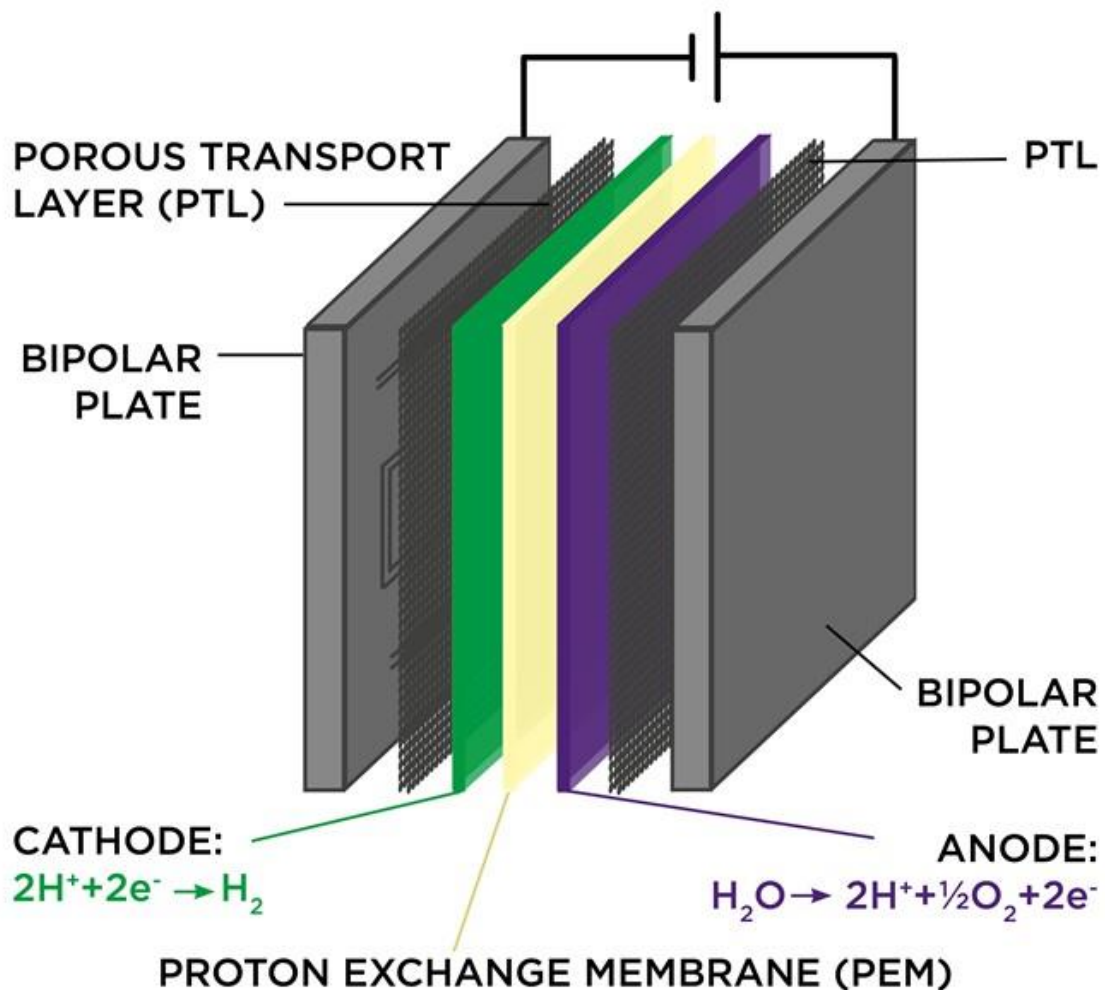
PEM water electrolysis využívá ke své funkci protonově vodivou membránu (PEM). Princip metody, respektive její proces začíná na anodě, kam je mechanicky přivedena voda, která se na katalyzátorech štěpí na kyslík, proton vodíku a elektron.



Protony vodíku jsou skrze membránu přivedeny na katodu, kam jsou zároveň externím zdrojem napětí přivedeny elektrony. Protony se spojí s elektrony a vzniká vodík.



Výsledkem celého procesu je tedy vodík na katodě a kyslík vyloučený na anodě. [1] Celkové schéma je zobrazeno níže (Obrázek 4).



Obrázek 4: PEM schéma [5]

Výhodou PEM elektrolýzy je například vyšší proudová hustota, která může být $0,6 - 2 A/cm^2$ oproti proudové hustotě alkalické elektrolýzy, která dosahuje hodnot $0,2 - 0,4 A/cm^2$. [3] Dalšími výhodami jsou vyšší napěťová efektivita, vysoká čistota produkovaného vodíku a kompaktní design. Velmi často je v případě PEM elektrolýzéri zmiňována schopnost rychlé reakce na kolísající vstupní proud, respektive schopnost operovat na celé škále své pracovní kapacity. [6] Tato vlastnost je výhodná právě ve spojení s obnovitelnými zdroji energie, navíc v různých výkonových aplikacích. Mezi nevýhody se řadí například vysoká cena komponent nebo kyselé korozivní prostředí. [1]

Pro lepší porovnání nabízených výhod a nevýhod výše uvedených technologií výroby vodíku je zde uvedena následující tabulka.

Tabulka 2: Porovnání technologií výroby vodíku, přeloženo a upraveno z [3]

	Výhody	Nevýhody
Alkaline	Dlouhodobě stabilní	Nízká proudová hustota
	Nízká cena	Křížení plynů, nízká čistota vodíku
	Poměrně dobře zavedená technologie	Nižší pracovní tlaky
SOE	Vysoká účinnost	Horší trvanlivost
	Vysoké pracovní tlaky	Masivní konstrukce
	Dobrá účinnost	
PEM	Vysoká čistota plynů	Vysoká cena komponent
	Rychlá odezva systému	Korozivní prostředí
	Kompaktní design	

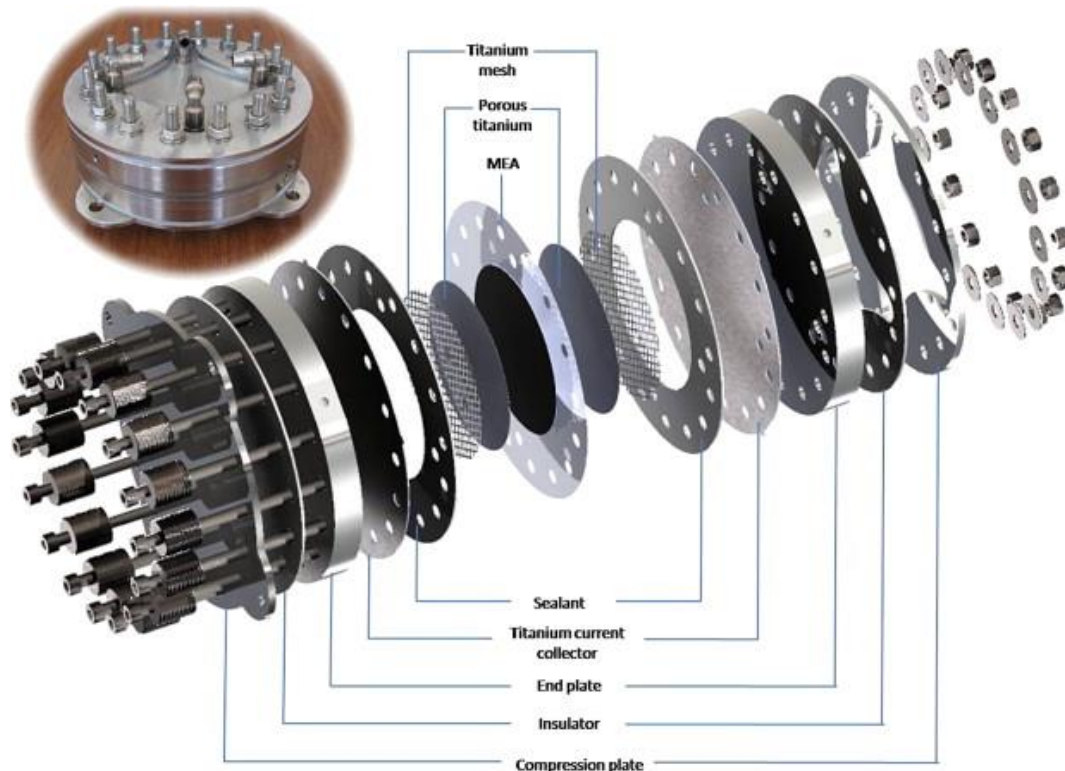
Hlavními komponenty PEM elektrolyzátoru jsou sestava membránových elektrod neboli MEA (Membrane electrode assemblies), proudový kolektor a separační vrstvy.

MEA je páteří celého elektrolyzátoru. Je tvořena perfluorosulfátovou polymerní membránou nejčastěji od výrobce DuPont pod obchodním názvem Nafion. Membrána PEM je protonově vodivá a je pokryta katalytickými vrstvami, a umožňuje tak správnou funkci PEM elektrolýzy. Membrána je poměrně náchylná na porušení při manipulaci. Seběmenší mechanické poškození rapidně snižuje její účinnost a často vede k úplnému zničení článku.

Proudové kolektory neboli katoda a anoda jsou využívány k rozvodu elektrického proudu po celé ploše membrány. Musí být tedy dobře elektricky vodivé. Vzhledem k prostředí, ve kterém pracují, musí být rovněž odolné korozi. Mezi vlastnosti, které ovlivňují správnou funkci celého elektrolyzátoru, se řadí primárně elektrická vodivost. Obvykle se používají desky z titanu, právě kvůli vhodným výše zmíněným vlastnostem. [1]

Separční vrstvy se rovněž mohou vyrábět z titanu, vedle něj jsou však k dispozici i materiály jako nerezová ocel nebo platina. Velmi důležitou roli hraje porézní struktura desky, jelikož jejím primárním účelem je distribuce vody po celém povrchu membrány. Separční desky zároveň vedou elektrický proud z proudového kolektoru k membráně. Vzhledem k požadavkům se používají perforované plechové desky, tahokovové desky nebo různé druhy plstí.

Na následujícím obrázku je rozpad PEM elektrolyzátoru (Obrázek 5). Vedle již popsaných hlavních komponent, jsou zde vidět doplňující komponenty, které zlepšují celkovou účinnost elektrolyzátoru. Příkladem může být titanová porézní vrstva.



Obrázek 5: Jednotlivé části PEM elektrolyzátoru [7]

V závěru této kapitoly jsou představeny konkrétní konstrukční řešení pro výše zmíněné technologie výroby vodíku. Aby bylo porovnání co možná nejpřesnější mají představené elektrolyzéry podobný počet cell neboli článků. Alkalický elektrolyzér i elektrolyzér používající princip SOE má deset článků. PEM elektrolyzér jich má osm.

Prvně budou porovnány elektrolyzéry technologie PEM a Alkalický u kterých bylo možné najít technické specifikace.



Obrázek 6: PEM elektrolyzér [8]



Obrázek 7: Alkalický elektrolyzér [9]

Tabulka 3: Porovnání PEM a alkalického elektrolyzéro [8],[9]

Počet cell	8	10
Rozměr	ø 140 mm	ø 265 mm
Tok H ₂	0 – 2 l/min	4 – 7 l/min
Napětí	8 V	18 V
Max. proud	72 A	100 A
Výkon	0,5 kW	1,5 kW

Uvedené porovnání může na první pohled působit zavádějícím dojmem, jelikož rozměry obou elektrolyzérů jsou výrazně odlišné. Je proto potřeba brát v potaz že PEM elektrolyzér má pouze osm cell, a zároveň má zhruba poloviční funkční plochu na každý článek.

Pro elektrolyzér na principu SOE nebyly nalezeny potřebné parametry pro porovnání, proto je k dispozici alespoň obrázek konstrukce takového elektrolyzéro (Obrázek 8).



Obrázek 8: SOE elektrolyzér [11]

Společným charakterem všech vodíkových elektrolyzérů je fakt že se jedná o konstrukci složenou z několika různých desek. Vzájemný plošný kontakt je pak zprostředkován více či méně početným šroubovým polem.

2.2. Rešerše edukačních zařízení

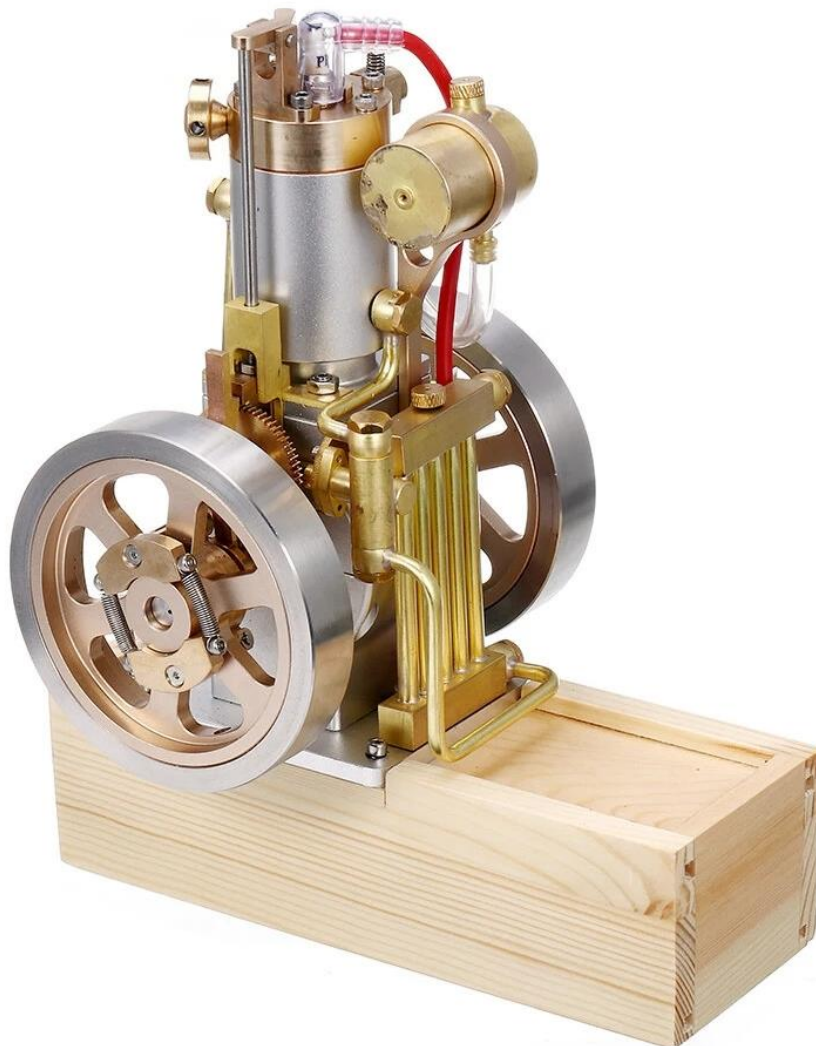
Jednotným znakem studijních zařízení a učebních pomůcek je názornost, zřetelnost. Cílem každého takového produktu je přiblížit danou problematiku precizně a exaktně, ale zároveň jednoduše a pochopitelně. Zařízení by se mělo ideálně zabývat pouze jedním konkrétním procesem, jevem či cyklem. V následující části budou představeny jednotlivé konstrukční principy, které jsem pozoroval na vybraných edukačních pomůčkách a zařízeních. V této části jsem se zabýval rovněž edukačními hračkami pro děti, jelikož i na takových výrobcích je možné jisté principy pozorovat.

Jako první bych uvedl jednoduchost. Už Jan Amos Komenský hovořil o principu učit se od jednoduchých věcí po složitější. Proto si myslím, že chceme – li někomu vysvětlit danou problematiku tak, aby ji pochopil a porozuměl, je potřeba začít právě u jednoduchosti. Danou problematiku nekomplikovat. Zabývat se pouze jednou oblastí. Pochopitelně musíme míru komplikovanosti upravit podle cílového uživatele a komplexnosti jevu či procesu, který chceme vysvětlit. Takový princip můžeme spatřit například na produktu hydraulicky poháněné robotické ruky od společnosti Elenco (Obrázek 9), kde jsou vidět hydraulické válce převádějící tlakovou energii kapaliny na pohyb. [12]



Obrázek 9: Hydraulicky ovládaná pohyblivá ruka [12]

Druhý princip, který se vyskytuje ve většině edukačních zařízení, a je koneckonců patrný i na předchozím příkladu, by se nechal popsat jako možnost vidět z celého procesu co možná nejvíce. Z konstrukčního hlediska je dle tohoto přístupu žádoucí ponechat maximum funkcí a procesů viditelných. Oproti běžné uživatelské produkci se jedná o postup v zásadě opačný, jelikož na běžných výrobcích je snaha celé zařízení zakrytovat. Tím pádem co nejvíce zamezit nežádoucímu zásahu do produktu. Pakliže je naším požadavkem názornost, je potřeba naopak co nejvíce věcí zpřístupnit a dát tak uživateli možnost nahlédnout na jednotlivé děje. Příkladem nám může být produktová řada od firmy Eachine zabývající se vědou a objevováním (Obrázek 10).



Obrázek 10: Stirlingův motor [14]

Ve zmíněném případě se jedná o vertikální Stirlingův motor vybavený vodní pumpou a vodním chladícím systémem. Není zde pochopitelně vidět celý proces, avšak je patrná snaha nechat co nejvíce procesů viditelných.

Dalším příkladem, kdy je uživateli umožněno spatřit princip procesu co možná nejvíce, je k vidění na následujícím výukovém modelu solárního vozu od společnosti PRIME solar (Obrázek 11).



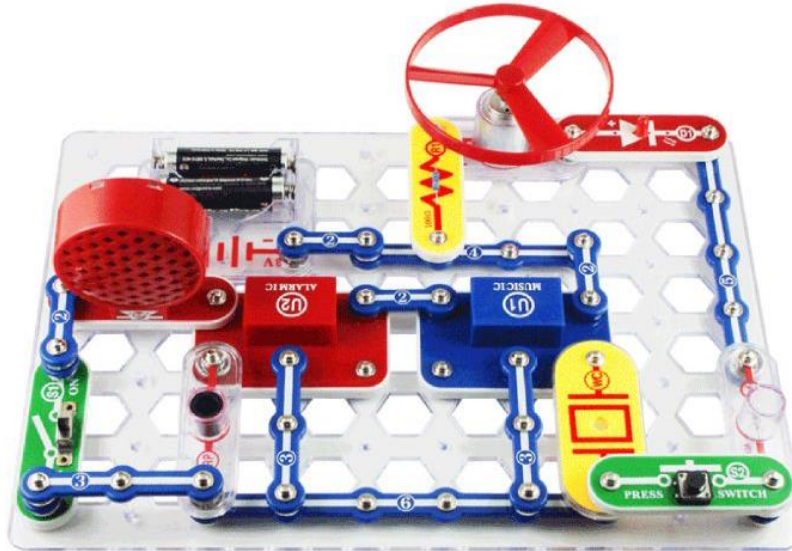
Obrázek 11: Model solárního vozu [15]

Princip třetí spočívá v co největším zapojení uživatele do procesu stavby a přípravy výrobku. V případě, že se člověk na přípravě podílí, je pro něj snazší daný princip pochopit. Nabízí to zároveň možnost se z případných chyb poučit a sám si je opravit. Pochopitelně některé procesy není možné konstrukčně navrhnout tak, aby si je mohl uživatel sám sestavit. V celé řadě odvětví je to nemožné, protože koncový uživatel nemá potřebné vybavení či znalosti. Jsou však aplikace, kde to možné je. Takovým příkladem může být stavebnice vystřelovací rampy pro papírovou raketu od společnosti Smartivity (Obrázek 12).



Obrázek 12: Odpalovací rampa [16]

Stejný princip je použit u stavebnice společnosti Snap Circuits, která umožňuje skládat různé elektrické obvody (Obrázek 13). Na obou předchozích příkladech je patrné i použití prvních principů a sice jednoduchosti a snahy ponechat co největší část konstrukce viditelnou.



Obrázek 13: Stavebnice elektrických obvodů [17]

Náročnější tématicke se věnuje například produkt společnosti solar4STEM. Jedná se o sestavu solárního kolektoru. Produkt je určen do škol a dává si za cíl představit studentům solární energii, zároveň základy elektroniky nebo geografie, konkrétně pohyb slunce. [18] Produkt je dodáván pouze jako soubor komponentů a je tedy nutné jej správně zapojit (Obrázek 14).



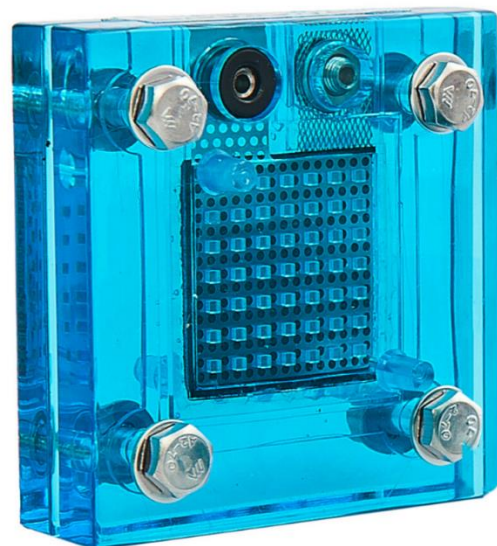
Obrázek 14: Sestava pro experimenty se solární energií [18]

2.3. Rešerše edukačních zařízení zabývajících se vodíkových technologií

V této části budou představeny edukační pomůcky týkající vodíkových technologií. Jelikož se tato diplomová práce zabývá návrhem a stavbou PEM elektrolyzérů, zaměřil jsem se v této části rešerše právě na produkty představující studentům elektrolyzu vodíku. Společným jmenovatelem všech elektrolyzérů na trhu by na první pohled bylo možné popsat slovem transparentnost. V zájmu výše popsaného principu „vidět co nejvíce“ jsou koncové desky elektrolyzérů vyráběny z transparentního materiálu, nejspíše polykarbonátu. Většina elektrolyzérů se prodává samostatně, a tím pádem s předpokladem, že si uživatel zajistí potřebné vybavení k provozu, jako například multimetr nebo elektrické kabely. Konstrukce je tedy uzpůsobená tak, aby bylo zřejmé, kam připojit kabely a elektrolyzér se zbytečně neničil. Příkladem je třeba jednocelový elektrolyzér od společnosti H-TEC (Obrázek 15). Velmi obdobný produkt, avšak doslova v bledě modrém, nabízí společnost Horizon Educational (Obrázek 16).



Obrázek 15: Elektrolyzér, H-TEC [19]



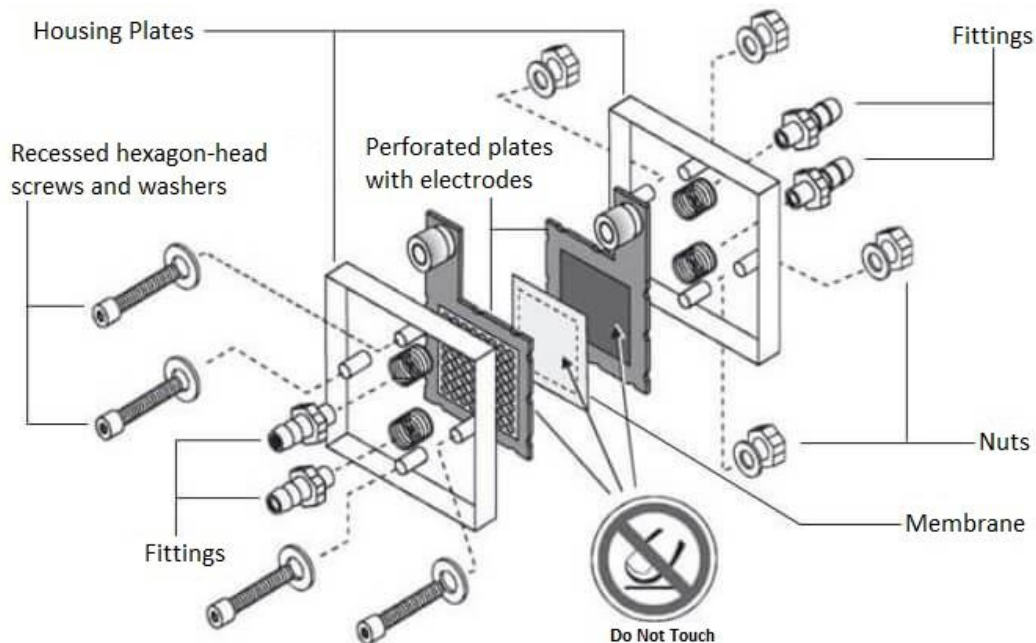
Obrázek 16: Elektrolyzér, Horizon educational [20]

Netradiční přístup je zvolen u elektrolyzáru dostupného na internetovém obchodu Fuelcell store (Obrázek 17). Elektrolyzáru je navržen tak, aby jej bylo možné rozložit, ukázat vnitřní komponenty studentům a následně jej opět sestavit.



Obrázek 17: Znovusestavitelný elektrolyzáru [21]

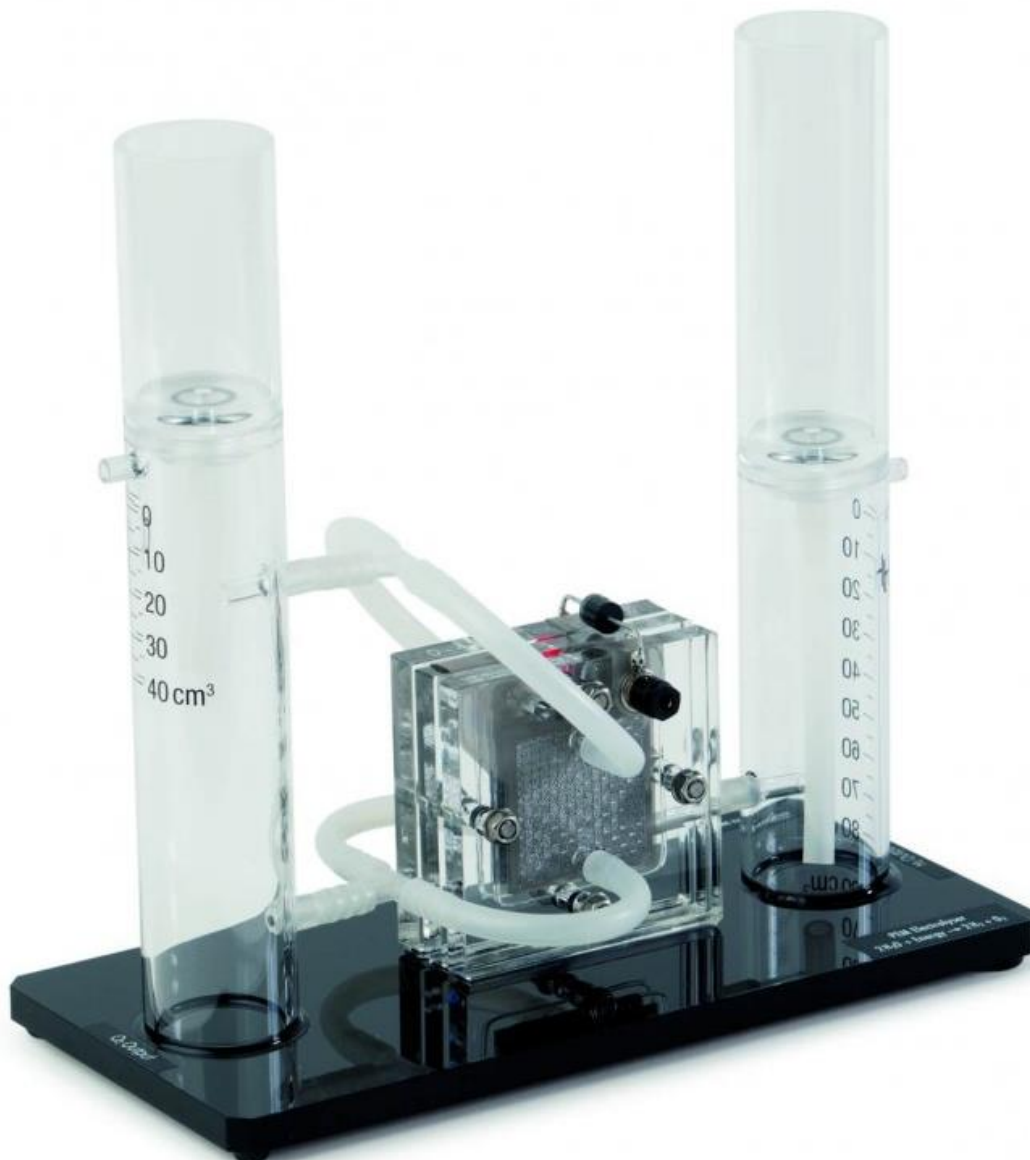
Vidět jádro elektrolyzáru je z edukačního pohledu zcela jistě zajímavé. Problém však nastává při manipulaci s jednotlivými komponenty, jelikož značná část je poměrně citlivá na poničení vlivem zacházení, ať už mechanicky nebo například chemickou reakcí s lidským potem. K produktu je dodáván manuál, jak s komponenty zacházet, a schéma, jak jej správně sestavit. [21] Je však nevyhnutelné, že s každým rozložením a následným sestavením se zvyšuje riziko poruchy (Obrázek 18).



Obrázek 18: Schéma znovusestavitelného elektrolyzáru [21]

Elektrolyzéry se na trhu objevují rovněž ve studijních setech, primárně od již zmiňovaných firem H-TEC a Horizon Educational. Základem je pochopitelně vlastní elektrolyzátor doplněný o různé komponenty podle složitosti a samozřejmě ceny daného kompletu.

Jeden z takových studijních setů nabízí například společnost H-TEC (Obrázek 19). Tentokrát se jedná o sadu spíše jednodušší, kde je elektrolyzátor doplněn pouze dvěma odměrnými válci na měření vody vstupující do systému, a na měření vody, která se odlučuje na konci chemického procesu.



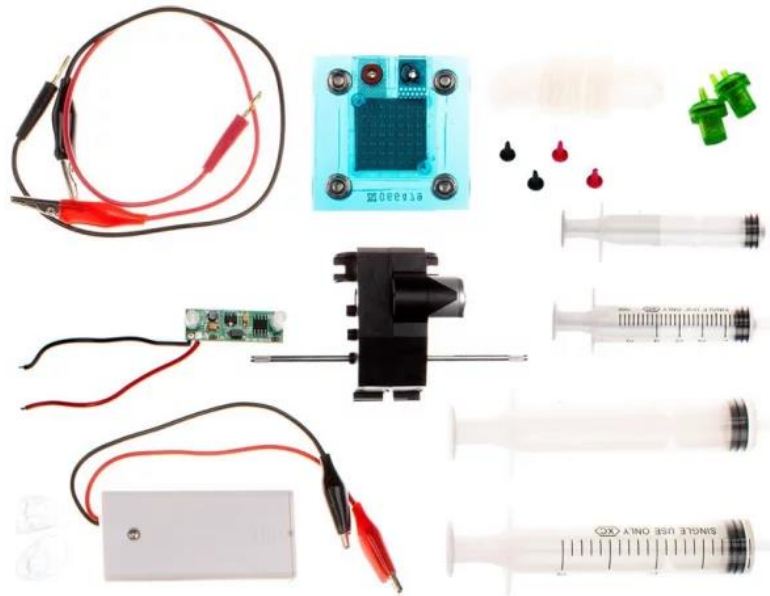
Obrázek 19: Elektrolyzérová sada, H-TEC [22]

Na trhu se objevují i výrazně komplikovanější sestavy. Ty jsou zpravidla doplněny o zdroj obnovitelné energie ať už ve formě fotovoltaických panelů, nebo malé větrné věže. Níže je vidět produkt od společnosti Horizon Educational (Obrázek 20). Zde použitý elektrolyzátor je možné zapojit obousměrně, tudíž v opačném zapojení je možné jej využívat jako palivový článek. To umožňuje studentům představit celý vodíkový cyklus popsany v úvodní kapitole. A sice přeměnu obnovitelné energie na elektřinu a následně na vodík pomocí elektrolyzátoru, a následně přeměny vodíku na elektřinu pomocí palivového článku.



Obrázek 20: Sada s použitím reversibilního elektrolyzátoru [23]

Studentsky vděčné jsou sady, kde je použitý reversibilní elektrolyzátor (Obrázek 21). Sada je rovněž vybavena elektromotorem se zabudovanou hřídelí, která může sloužit jako pohon k vozidlu, které studenti sami navrhnu. Příkladem můžou být níže uvedené konstrukce (Obrázek 22).



Obrázek 21: Vodíková studentská sada [24]



Obrázek 22: Studentské modely vodíkových vozidel [24]

3. Konstrukční návrh vodíkového elektrolyzáru

Vzhledem k primárnímu cíli navrhovaného zařízení je v první řadě nutné vyřešit, jak upravit již fungující průmyslový vodíkový elektrolyzáru tak, aby mohl sloužit k edukačním účelům. Z rešerše vodíkových zařízení pro školní prostředí je patrné, že vhodnou cestou je zprůhlednění koncové desky, která tak nabízí pohled na funkční část elektrolyzáru a sice na protonově vodivou membránu. Taková úprava s sebou nese několik konstrukčních problémů. Jaký průhledný materiál použít. Jak zajistit viditelnost doprostřed elektrolyzáru při zachování dostatečného kontaktu mezi proudovým kolektorem a separační vrstvou. Případně kam umístit konektory, aby nebránily výhledu.

Jistým zjednodušením tohoto problému je fakt, že zajímavý pohled na membránu nabízí pouze vodní strana elektrolyzáru, kam je přiváděna destilovaná voda. Část molekul vody se při průchodu katodou rozkládá na molekuly vodíku a kyslíku. Jádra vodíku pak prochází protonově vodivou membránou. Kyslík se mísí s vodou, která zůstala nerozdělena a vzniká tak voda s bublinami kyslíku, která se vrací zpět do vodní nádrže. Část tohoto procesu je okem viditelná ve formě probublávání molekul kyslíku v oblasti anody. Oproti tomu na vodíkové straně se slučují protonová jádra vodíku s elektrony přivedenými na katodu a vznikají molekuly vodíku. Tento proces je sice hlavní funkcí vodíkového elektrolyzáru, ale bohužel není pozorovatelný, a tudíž není nutné tuto část elektrolyzáru zviditelnit.

3.1. Volba materiálu pro koncovou desku

Co se týče možného použitelného materiálu, v úvahu připadají dva. Polykarbonát a polymethylmetakrylát spíše známý pod obchodním názvem plexisklo. Pro uvažovanou aplikaci jsou zásadní dvě vlastnosti. Pevnost, respektive houževnatost materiálu a průhlednost. Oba materiály jsou plasty a oproti sklu jsou výrazně méně pevné, ale na druhou stranu jsou výrazně houževnatější.

Tabulka 4: Porovnání pevností v tlaku vybraných materiálů

Materiál	Pevnost v tlaku
Plexisklo	75 MPa [25]
Polykarbonát	80 MPa [25]
Sklo	750 MPa [26]

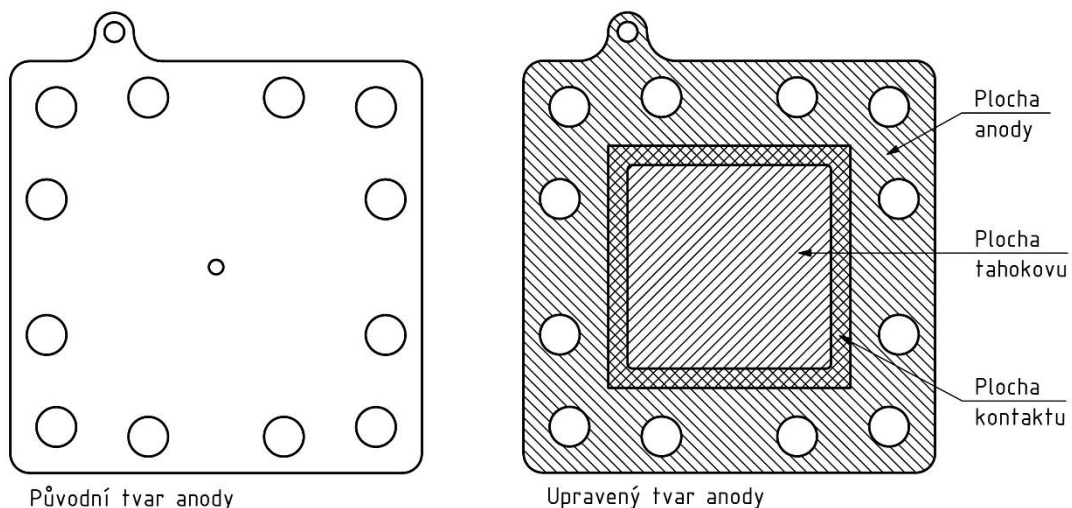
Porovnáme-li oba materiály navzájem zjistíme, že polykarbonát je nepatrně pevnější, a oproti polymethylmetakrylátu je výrazně křehčí. [27] Polykarbonát má pevnost v tlaku vyšší, a je výrazně houževnatější a v případě porušení nedojde k tříštivému lomu. Polykarbonát je tedy z tohoto pohledu pro tuto aplikaci vhodnější, jelikož počítáme s nerovnoměrným zatížením od šroubového pole po obvodu elektrolyzáru. [28]

Co se průhlednosti týče, je z počátku velmi podobná. Problém nastává po delším časovém období, kdy jsou materiály vystaveny UV záření. Zatímco plexisklo vlivem UV záření v podstatě nedegraduje, polykarbonát postupně ztrácí svou průhlednost, bývá proto opatřen UV odolnou vrstvou, která jeho odolnost zvyšuje. [29] Pro výslednou aplikaci byl nakonec vybrán polykarbonát, jelikož se nepředpokládá tak intenzivní vystavení elektrolyzáru přímým slunečním paprskům, zato je potřeba počítat se značným nerovnoměrným zatížením. Pro volbu je potřeba uvažovat i fakt, že v případě porušení pevnosti se polykarbonát netříští na rozdíl od plexiskla. To je z důvodu bezpečnosti poměrně důležitý aspekt.

3.2. Konstrukce polykarbonátové koncové desky

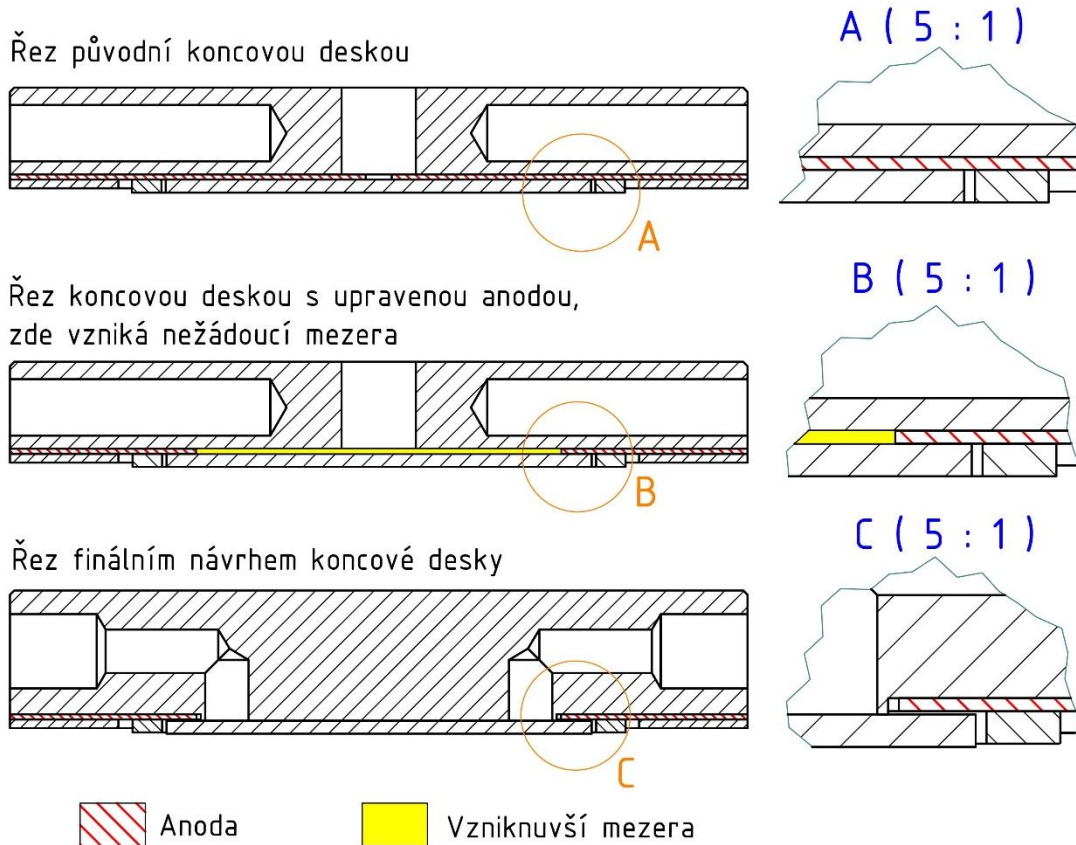
Poté, co se určil materiál na výrobu průhledné koncové desky, je potřeba navrhnout koncovou desku takovým způsobem, aby umožňovala pohled doprostřed elektrolyzáru při zachování své funkčnosti.

První problém vzniká v místě kontaktu proudového kolektoru na vodní straně a sice anody, spolu se separační vrstvou, v této aplikaci tvořenou tahokovovou destičkou. Ta má stejné rozměry jako MEA (protonově vodivá membrána). Pro správnou funkci je nutná dostatečná kontaktní plocha mezi elektrodou a tahokovovou deskou. Oproti klasickému tvaru anody je tedy potřeba použít anodu, která má ve svém středu čtvercový otvor kterým je vidět skrz. Otvor musí být menší, než je rozměr tahokovové desky, jelikož je potřeba zachovat dostatečnou kontaktní plochu. Velikost a tvar kontaktní plochy je patrný z následujícího obrázku (Obrázek 23). Klesajícími šrafy je vyobrazena plocha katody. Šrafy, které zleva doprava stoupají, zobrazují plochu tahokovové desky. Křížově vyšrafovaná oblast je pak plocha elektrického kontaktu.



Obrázek 23: Původní a upravený tvar anody

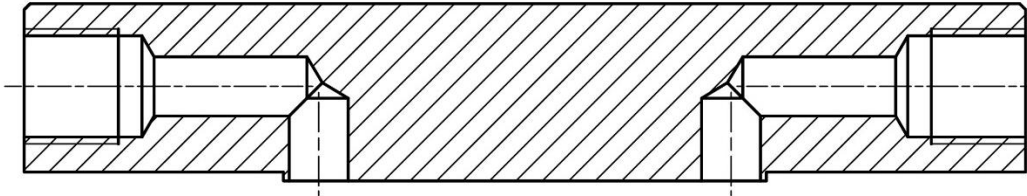
Pro správnou funkci PEM vodíkového elektrolyzáru je zapotřebí dostatečný kontakt mezi jednotlivými vrstvami. Vytvoření čtvercové díry v katodě umožňuje nahlédnout dovnitř celého elektrolyzáru, zároveň s sebou nese následující problém. Ten spočívá právě v tom, že v místě výřezu není žádný materiál, který by tlačil na tahokovovou desku. Proto je nutné průhlednou polykarbonátovou desku upravit tak, aby byl v místě výřezu stále přenesen tlak na tahokovovou separační vrstvu. Místo tohoto kontaktu před a po úpravě je zobrazeno níže (Obrázek 24).



Obrázek 24: Řešení vzniknuvší mezery

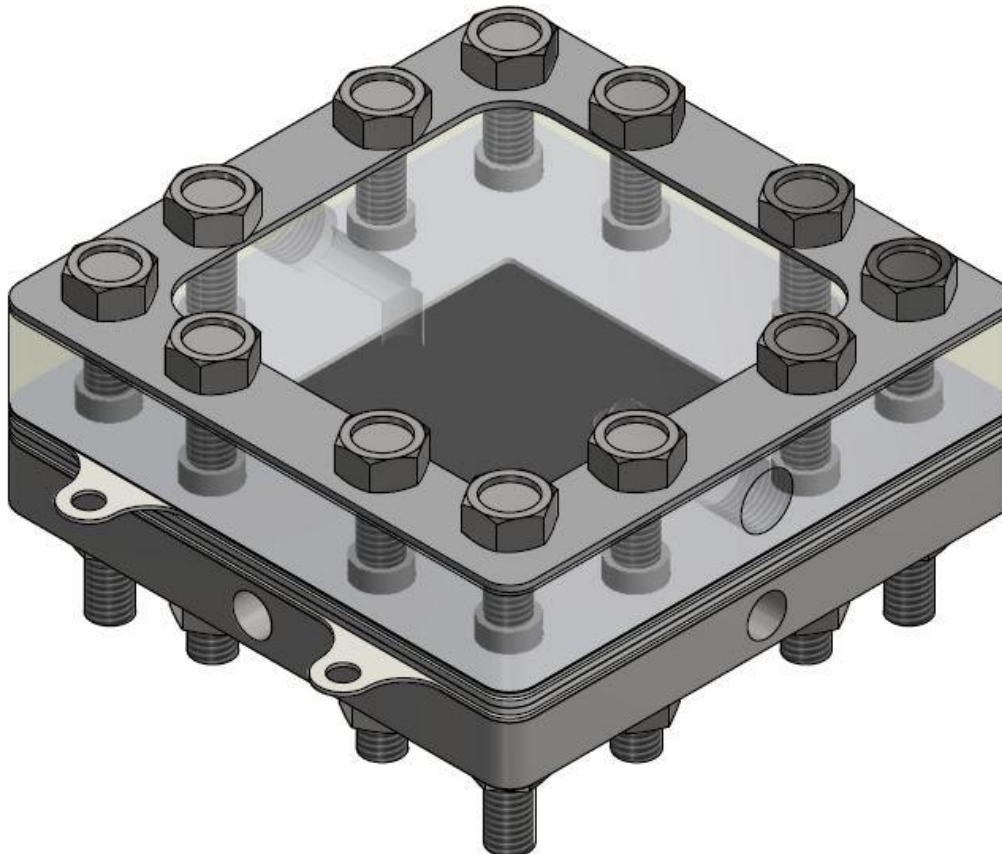
V detailu B je vidět, že k červeně šrafované anodě vždy přímo doléhá jak koncová deska z vrchu, tak tahokov, těsnění či plastová mezipodložka ze spodní strany. Na následujícím schématu je žlutou barvou zvýrazněná mezera, která vznikne vytvořením čtvercové díry v anodě. Mezi tahokovem a koncovou deskou je pak uprostřed mezera odpovídající tloušťce katody, tedy 0,6 mm. Na posledním schématu je vidět, že navržená polykarbonátová deska má uprostřed vytaženou plochu, která onu mezeru zaplní.

Významnou úpravou je umístění připojovacích konektorů. Jelikož upravujeme pouze vodní stranu elektrolyzéry, stačí se zabývat pouze konektory, které přivádí a odvádí vodu. V průmyslové aplikaci jsou konektory umístěny kolmo na koncovou desku. V takovém případě však poměrně nevzhledně vyčnívají z jinak relativně kompaktní konstrukce. V případě edukačního elektrolyzéry by pak mohly bránit ve výhledu. Proto byly konektory přesunuty po stranách polykarbonátové desky. Voda je pak na funkční plochu přiváděna kolmo, pomocí dvou vzájemně se protínajících otvorů, jak je vidět níže (Obrázek 25).



Obrázek 25: Vrtání pro konektory

Výsledná sestava elektrolyzéry pak vypadá následovně (Obrázek 26).



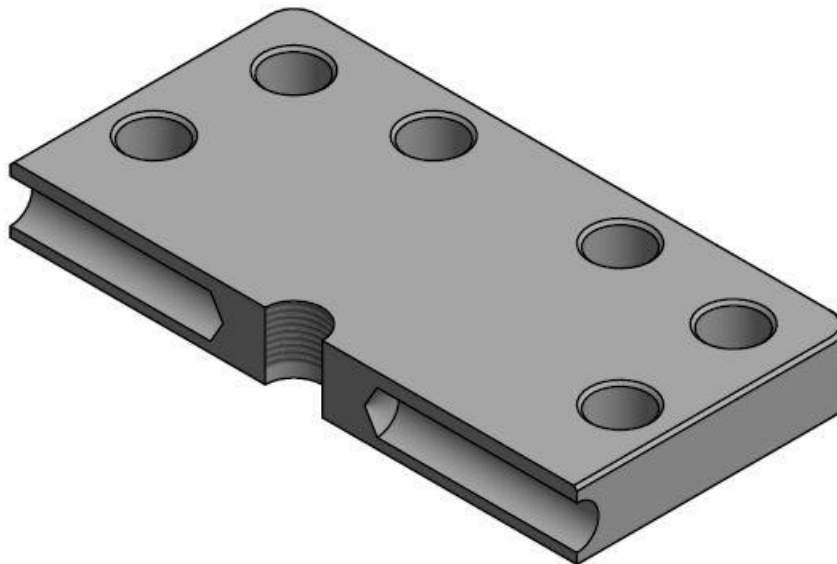
Obrázek 26: Elektrolyzér s polykarbonátovou koncovou deskou

3.3. Úprava hliníkové koncové desky

Účinnost vodíkového elektrolyzáru je poměrně zásadně závislá na teplotě vody protékající elektrolyzárem. U průmyslových elektrolyzáru je teplo generováno samotnou funkcí elektrolyzáru, a jelikož takový elektrolyzáru většinou pracuje poměrně dlouhou dobu není nutné vodní okruh jakkoli dále přehřívat. U edukačního elektrolyzáru se však s dlouhodobým provozem nepočítá, proto je nutné elektrolyzáru pro ohřev vody upravit. Nejvhodnější místo, kde ohřev provádět, je skrze hliníkovou desku na vodíkové, respektive katodové koncové desce elektrolyzáru. Aby byl ohřev vody dostatečně dynamický, je elektrolyzáru vybaven dvěma topnými patronami. Jedná se o patrony o výkonu 31,6 W. Jedna patrona je schopna ohřát půl litru vody za 23 minut, jak popisuje níže uvedená rovnice (4), vycházející z výpočtu energie a času potřebného na ohřev materiálu. [30] Jelikož není ohřívána přímo voda, ale hliníková koncová deska, jsou použity dvě patrony.

$$(4) \tau = \frac{m \cdot c \cdot \Delta t}{P \cdot \eta} = \frac{0,5 \cdot 4200 \cdot 20}{31,6 \cdot 0,95} = 1399,1s = 23,3 \text{ min}$$

Patrony jsou instalovány v podélných vrtáních. Jejich umístění je graficky zobrazené níže (Obrázek 27).

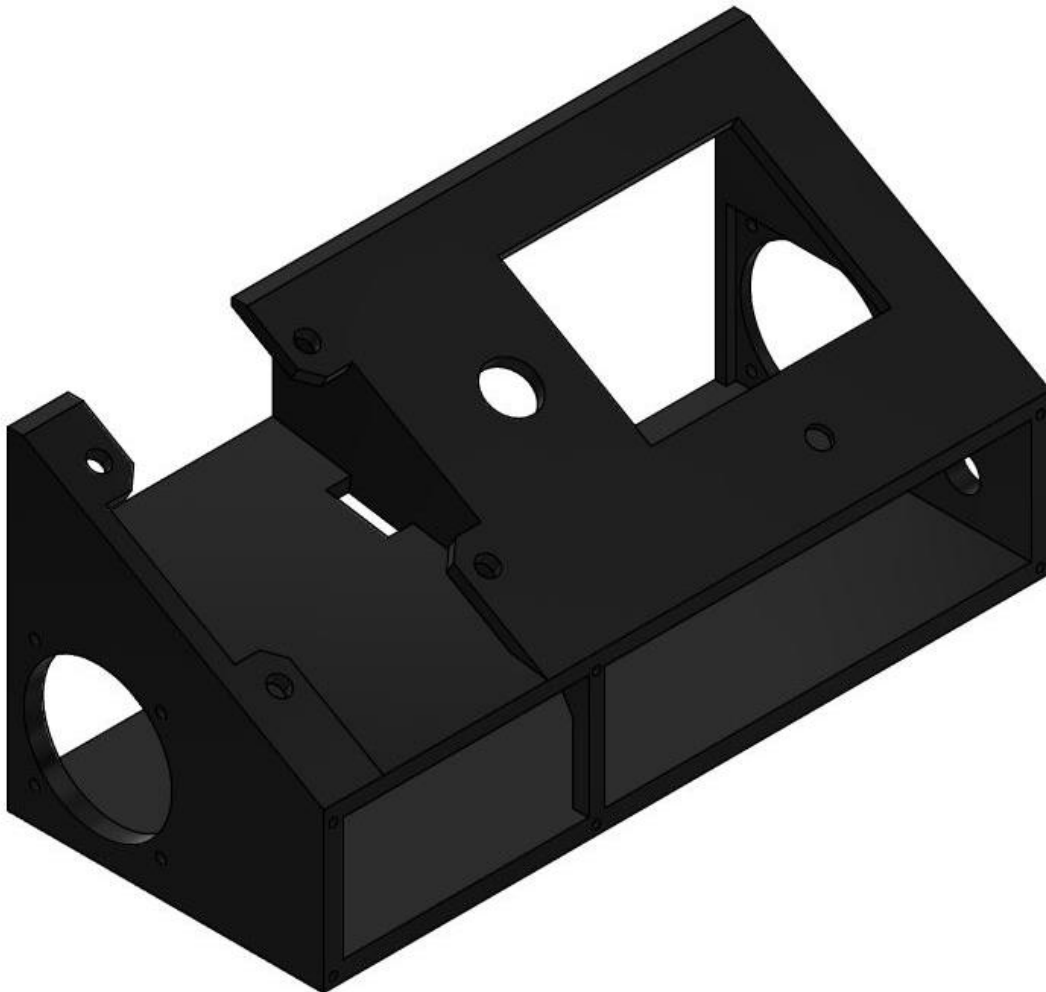


Obrázek 27: Vrtání pro topné patrony

3.4. Konstrukce komponent pro elektroniku

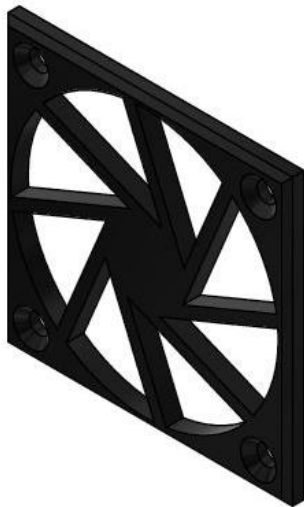
Součástí vodíkového elektrolyzérů není pouze samotný elektrolyzér. Aby byl celý produkt kompletní a použitelný právě v edukačním prostředí, je nutné elektrolyzér dovybavit o řídicí elektroniku zajišťující správný chod a případné měření hodnoty. Současně musí zařízení obsahovat komponenty zajišťující vodní okruh. Jedná se o nádrž s destilovanou vodou, čerpadlo a odlučovač.

Box pro elektroniku, ke kterému je následně připojen elektrolyzér, je navrhován s ohledem na jeho pozdější výrobu pomocí 3D tisku. Aby bylo zařízení maximálně bezpečné, je třeba elektrolyzér umístit nad řídicí elektroniku. Na tento požadavek je nutné brát zřetel z toho důvodu, že v případě úniku vodíku odchází vodík jakožto jeden z nelehčích plynů vždy vzhůru. V případě že by vodík unikl přes elektronické zařízení, na kterém by se vytvořil zkrat, mohlo by zařízení vybuchnout. Nejlepší možností je tak kontakt možného uniklého vodíku a elektroniky co nejvíce eliminovat. Při konstrukci boxu je potřeba myslet na umístění řídicího displeje, ovládacích tlačítek a ventilátoru. Níže je vidět finální verze boxu pro elektrolyzér a řídicí elektroniku (Obrázek 28).



Obrázek 28: Box pro elektrolyzér a řídicí elektroniku

Součástí navržené konstrukce byl i například kryt ventilátoru (Obrázek 29) nebo rámeček pro displej (Obrázek 30).

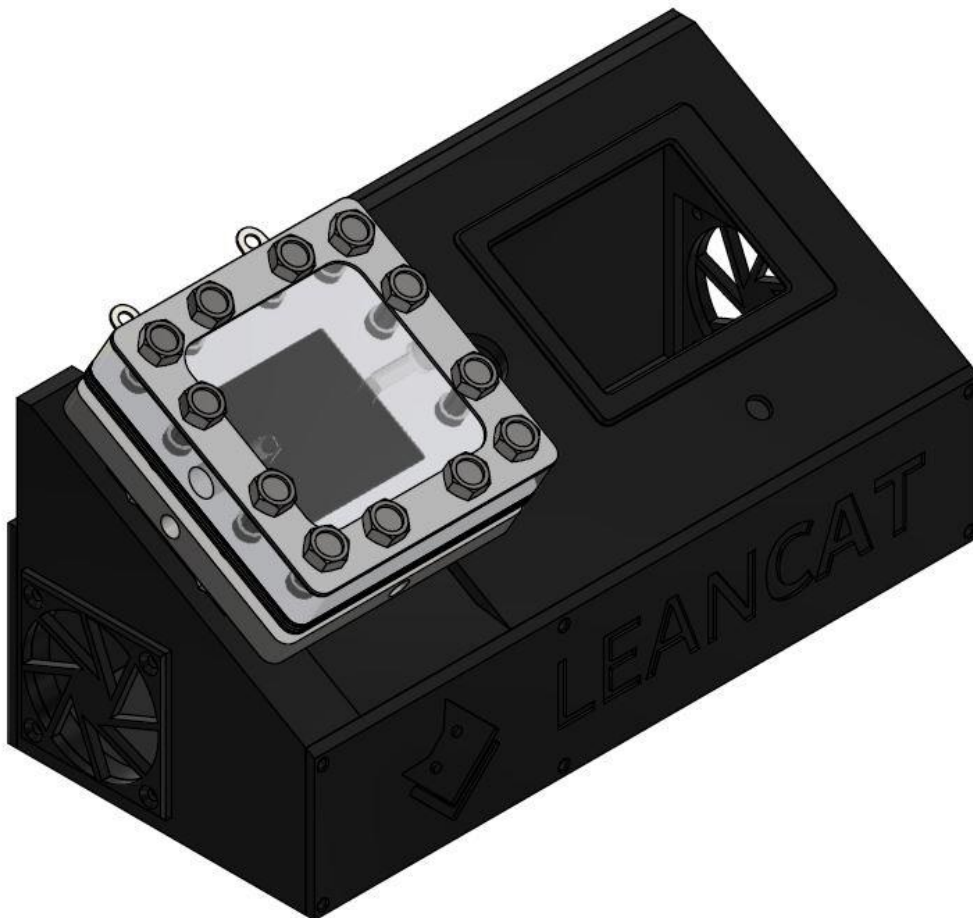


Obrázek 29: Kryt ventilátoru



Obrázek 30: Rámeček pro displej

Jak vypadá box v celkové sestavě je patrné níže (Obrázek 31). Aby bylo na elektrolyzér a řídicí displej co nejvíce vidět je horní deska tvarována tak, aby byl pozorovací úhel co nejpřímější. Displej je umístěn napravo do elektrolyzéro pro lepší ovladatelnost.



Obrázek 31: Elektrolyzér s boxem pro elektroniku

3.5. Konstrukce komponenty pro nádrž a odlučovač

Z vlastní funkce vodíkového elektrolyzáru vyplývá, že pro jeho správnou funkci je zapotřebí elektrický proud a nádrž s destilovanou a tím pádem nevodivou vodou. Dalším velmi podstatným komponentem vodíkového elektrolyzáru je odlučovač. Jeho funkce spočívá k oddělení kapének vody od výsledného produktu, a sice vodíku. Oba tyto komponenty jsou v tomto návrhu spojeny do jednoho funkčního bloku.

Vodní nádrže tvoří půllitrová plastová laboratorní lahev s širokým hrdlem (Obrázek 32). Jelikož je voda proudící skrze elektrolyzáru ohřívána až na teplotu 50 °C, je nutné, aby takovou teplotu nádrž vydržela. S ohledem na ohřev vody je navržena i velikost nádrže, aby nebylo nutné příliš dlouho čekat, než se celý objem ohřeje. Nádoba je doplněna o vstupní a výstupní trubice pro přívod a odvod vody pro elektrolyzáru. Aby nedošlo k přerušení přítoku vody do elektrolyzáru a tím pádem k jeho vysušení, je žádoucí, aby nádrž obsahovala plovákový senzor s čidlem (Obrázek 33).

Vodní nádrž je rovněž vybavena prvky pro uchycení čerpadla, které zajišťuje cirkulaci vody v anodovém okruhu.



Obrázek 32: Sada širokohrdlých lahví [31]

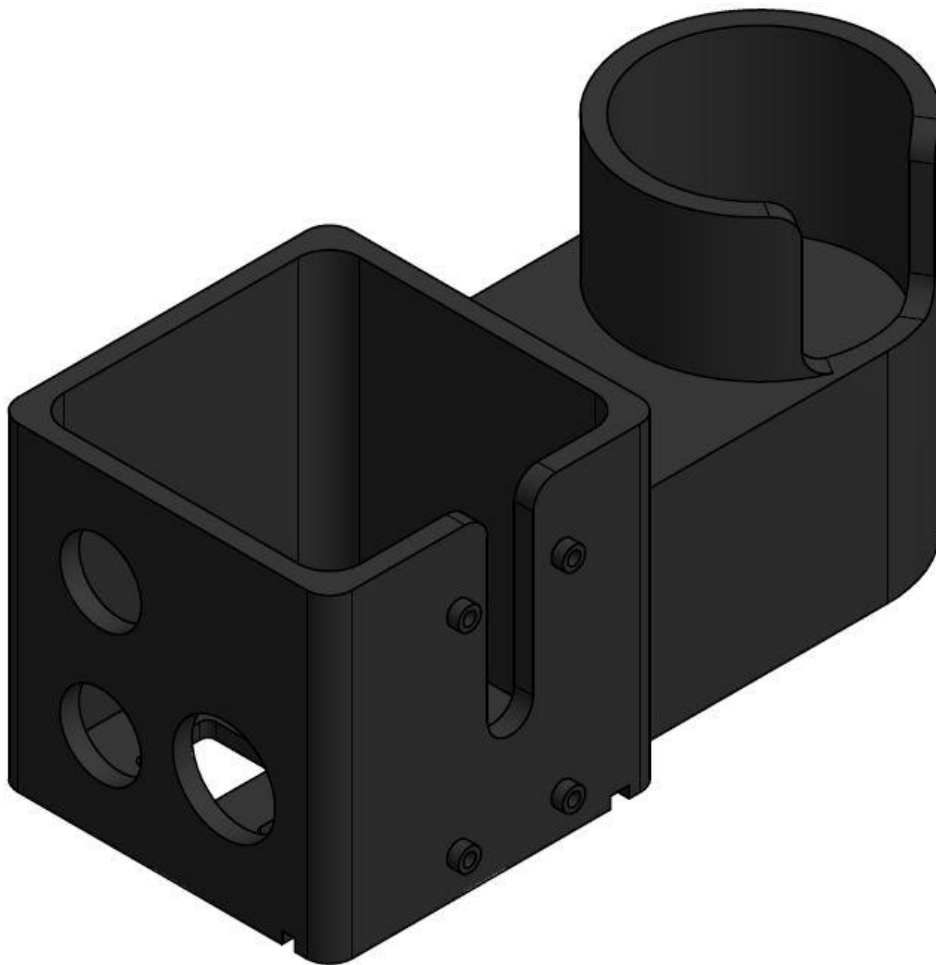


Obrázek 33: Plovákový senzor [32]

Odlučovač pro svou funkci využívá základního fyzikálního principu, a sice že voda je výrazně těžší než vodík. Jedná se tedy opět o laboratorní lahvičku, která má skrz víčko přivedeny dvě trubičky. Jednou přichází vodík s kapénkami vody a druhou pak odchází samotný vodík. Odloučené kapky vody se ukládají na dně nádoby. Z edukačního hlediska je zajímavé pozorovat množství odloučené vody, proto je držák vybaven výřezem, aby bylo možné množství vody odečítat.

Dnem funkčního bloku nádrže a odlučovače bylo nutné vést kabely pro signál z plováku a napájení led pásků, které sloužili jako podsvícení.

Kompletní 3D model funkčního bloku je uveden níže (Obrázek 34).



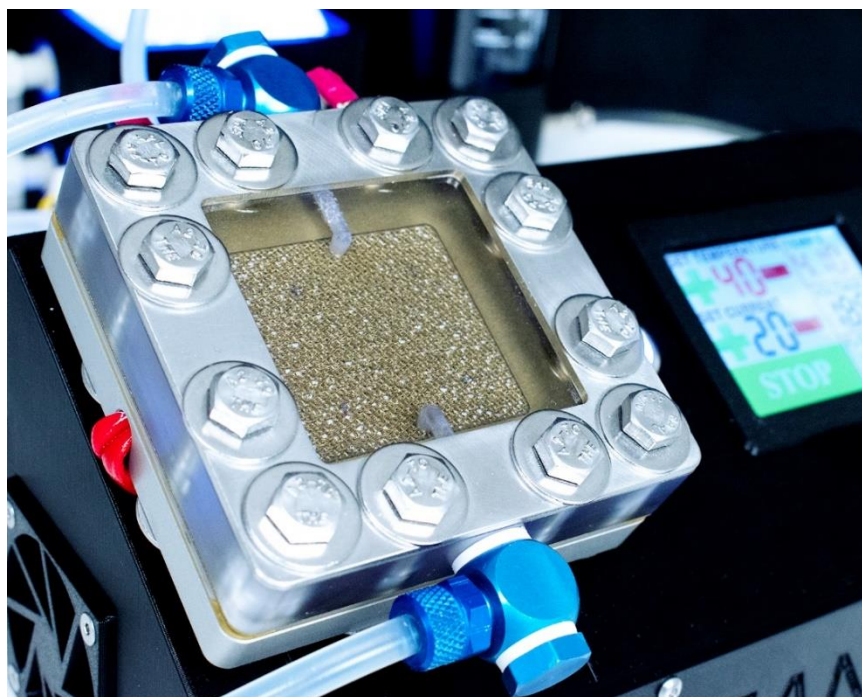
Obrázek 34: Blok pro nádrž a odlučovač

3.6. Výsledná podoba zařízení

Vodní elektrolyzátor pro edukační použití realizovala společnost LeanCat. Na následujících obrázcích je vidět výsledný produkt a pohled na anodový systém s tahokovovými mřížkami.



Obrázek 35: Výsledný vodíkový elektrolyzátor pro edukační účely [33]



Obrázek 36: Detail na samotný vodíkový elektrolyzátor [33]

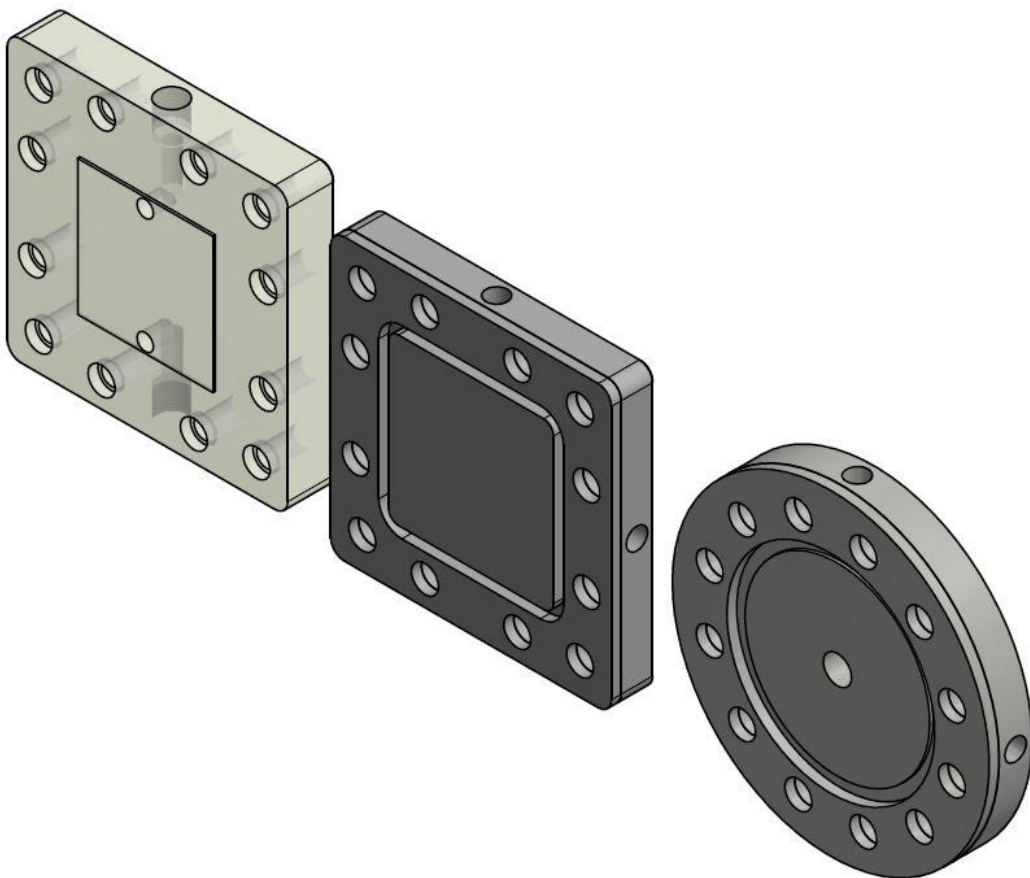
4. Deformační analýza

Požadavek na deformační analýzu vodíkového elektrolyzéru vychází z firmy LeanCat, kterou by zajímalo, jak se jednotlivé konstrukční řešení chovají v průběhu své funkce.

První deformační analýza se týká porovnání dvou tvarových řešení PEM vodíkového elektrolyzéru. Konkurenční výrobci používají pro své výrobky konstrukci kruhového tvaru. Výhodou takového řešení je přirozené rozložení sil. Nevýhodou je pak velikost odpadního materiálu při výrobě především funkčních prvků, jako jsou vlastní membrány či tahokovové vrstvy. Firma LeanCat používá čtvercovou konstrukci, která má daleko menší odpad. Nabízí se ovšem otázka, jak vypadá zatížení a rozložení sil uvnitř elektrolyzéru. Pro toto zadání byla vytvořena fiktivní konstrukce kruhového elektrolyzéru se zachováním stejné funkční plochy membrány a sice 2500 mm^2 .

V případě druhé úlohy se jedná o porovnání deformací v případě vodíkového elektrolyzéru pro edukační účely, kde je místo hliníkové koncové desky použita deska polykarbonátová, která se bude pochopitelně chovat jinak.

Celkově se tedy jedná o porovnání v zásadě třech různých tvarových či materiálových řešení (Obrázek 37).

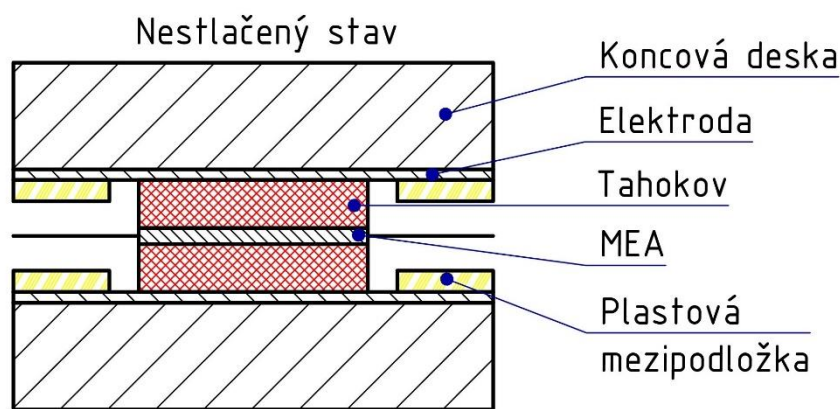


Obrázek 37: Tři různá konstrukční řešení pro deformační analýzu: Polykarbonátová deska (vlevo), čtvercová hliníková deska (uprostřed), kruhová hliníková deska (vpravo)

4.1. Proces sestavení vodíkového elektrolyzáru

Pro správné pochopení deformační analýzy je nutné porozumět montážnímu procesu. Pro názornost je proces rozdělen do tří fází.

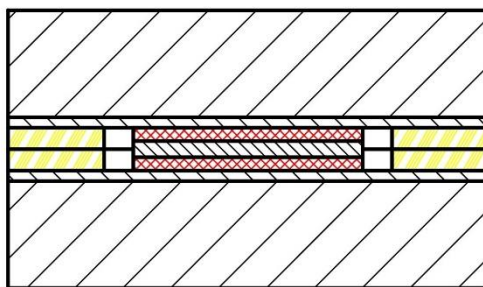
Zprvu je nutné jednotlivé vrstvy poskládat na sebe ve správném pořadí. Některé vrstvy, jako například proudové kolektory, zasahují přes celý průřez elektrolyzáru. Jiné jsou ovšem pouze ve funkční části průřezu a ve zbytku průřezu musí být tím pádem jejich výsledná tloušťka nahrazena plastovými mezipodložkami. Příkladem takových vrstev je tahokovová mřížka nebo samotná MEA. Schématický řez elektrolyzárem v této fázi je zobrazen níže (Obrázek 38).



Obrázek 38: Schéma sestavení komponent vodíkového elektrolyzáru, první fáze

Jelikož je potřeba dosáhnout dobrého kontaktu mezi jednotlivými funkčními vrstvami, je nutné vnést do sestavy silové předpětí. To je vneseno ve druhé fázi montáže právě pomocí plastické deformace tahokovové desky. V praxi to znamená, že po sestavení elektrolyzéro je tloušťka funkčních vrstev o pár milimetrů větší, než je tloušťka okolních vrstev složených primárně z plastové mezipodložky a těsnících prvků. Po sestavení je tedy nutné celý elektrolyzér stlačit v ručním hydraulickém lisu, aby se tahokov stlačil natolik, že se do kontaktu dostanou i mezipodložky, které zajišťují konstantní deformaci tahokovu po celé funkční ploše elektrolyzéro (Obrázek 39). Tlak na hydraulickém lisu je v tuto chvíli 50 kg/cm^2 .

První stlačení $F=13\ 868,56 \text{ N}$



První dotek
plastové mezidesky.
Dochází primárně
ke stlačování
tahokovu

Obrázek 39: Schéma sestavení komponent vodíkového elektrolyzéro, druhá fáze

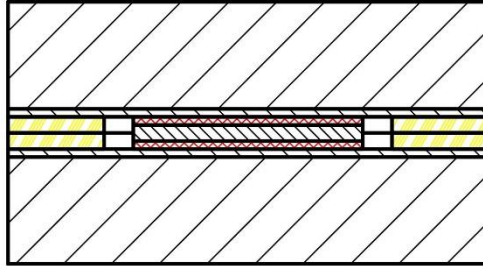
Pro pozdější použití jsou hodnota tlaku na lisu přepočítána na celkovou sílu, viz rovnice (5,6). Průměr hydraulického válce je 60 mm .

$$(5) F = p_1 \cdot g \cdot S = p_1 \cdot g \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}$$

$$(6) F_1 = 50 \cdot 9,81 \cdot \frac{\pi \cdot 6^2}{4} = 13\ 868,56 \text{ N}$$

Ve třetí fázi je elektrolyzátor následně stlačován, aby vznikla silová rezerva. V tento moment je tlak na lisu 105 kg/cm^2 . (Obrázek 40)

Druhé stlačení $F = 29\,123,98 \text{ N}$



Konečná fáze.
Zde se deformují
především plastové
mezidesky

Obrázek 40: Schéma sestavení komponent vodíkového elektrolyzátoru, třetí fáze

Hodnota tlaku na lisu je opět přepočtena na sílu

$$(7) F_2 = 105 \cdot 9,81 \cdot \frac{\pi \cdot 6^2}{4} = 29\,123,98 \text{ N}$$

Poté je v podstatě minimálním kroutícím momentem utaženo šroubové pole. Tento proces utahování má dvě hlavní výhody. Jednotlivé vrstvy jsou deformovány rovnoměrně a všechny najednou. Zároveň jsou šrouby následně zatíženy čistým tahem, čímž se v podstatě zvyšuje jejich únosnost.

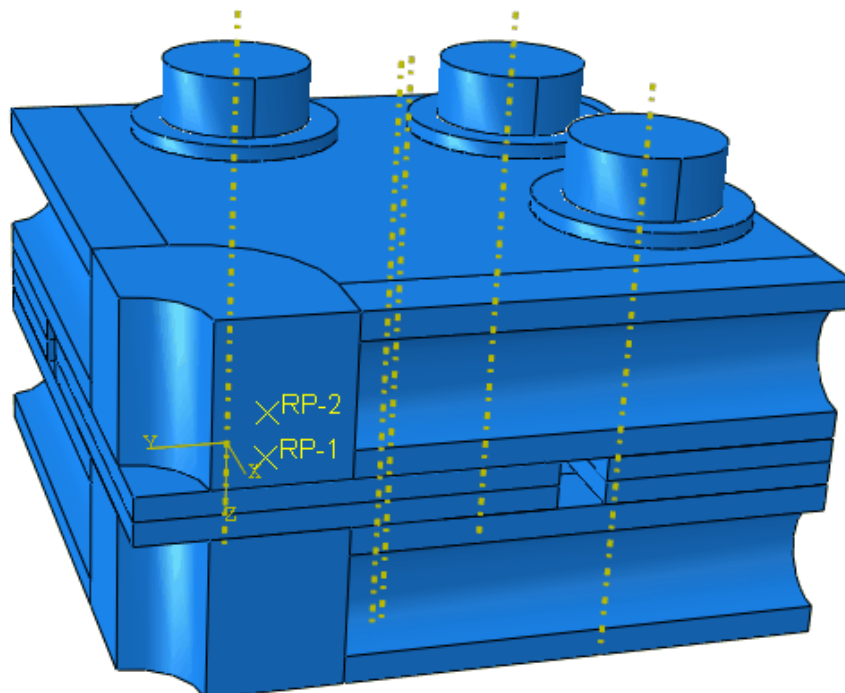
V průběhu své funkce pak není na elektrolyzátor vyvíjeno další zatížení. Deformační analýza se tedy zabývá primárně procesem montáže, kdy je do elektrolyzátoru vneseno zatížení právě stlačováním a následným uvolněním elektrolyzátoru lisem.

Deformační analýza se zabývá vývojem zatížení a deformací po odlehčení elektrolyzátoru lisem. Zatížení je do sestavy vneseno z hydraulického lisu přes montážní desku, jedná se tedy o zatížení spojitým tlakem. Naproti tomu po uvolnění se jedná o samostatné síly v místech šroubových spojů. Dalším zkoumaným aspektem je tvar a velikost tlakového pole pod plastovou mezidložkou.

4.2. Výpočetní 3D model

Pro správné, realitě odpovídající výsledky je nutné výpočetní model sestavit tak, aby byl dostatečně jednoduchý, ale zároveň věrně reprezentoval realitu. V tomto případě je použit výpočetní software Abaqus, jelikož analýza vede na kontaktní úlohu, a právě software Abaqus umí tento typ úloh řešit. Proces tvorby modelu je popsán na příkladu deformační analýzy průmyslového elektrolyzéry čtvercové konstrukce, kterou používá firma LeanCat. V tomto případě se jedná o hliníkovou koncovou desku z obou stran. Modelovou sestavu je třeba vytvořit v prostředí Abaqusu, jelikož se předpokládají pozdější úpravy, které by v případě importovaného modelu nebyly možné.

Pro zjednodušení výpočtu bylo využito dvakrát osově symetrické konstrukce. Výpočetní model je tedy čtvrtinovým modelem reálného tělesa. Následující úpravou je nahrazení funkčních vrstev elektrolyzéry pouze jednou vrstvou. Tato vrstva reprezentuje primárně tahokovovou mřížku především proto, že se na ní bude nejvíce projevovat deformace. K zanedbání ostatních vrstev bylo přistoupeno z toho důvodu, že jsou velmi tenké, tím pádem bude jejich deformace velmi malá a proto nepodstatná. Ze stejného důvodu nejsou ve výpočetním modelu uvažovány proudové kolektory (Obrázek 41).



Obrázek 41: Výpočtový 3D model v softwaru Abaqus

4.3. Materiálové vlastnosti pro výpočetní model

Aby mohl výpočet správně pracovat, je nutné jednotlivým materiálům v modulu „Property“ přiřadit dané materiálové charakteristiky. I přesto, že se tahokov chová plasticky, je mu v našem případě přiřazena elastická charakteristika. K tomuto zjednodušení bylo přistoupeno z důvodu velmi problematického určování daných vstupních hodnot. Pro potřeby výpočtu tedy uvažujeme chování materiálu jako elastické.

4.3.1. Určení poměrné deformace

První známou hodnotou je trvalá deformace tahokovu, jelikož je možné změřit tloušťku tahokovových vrstev před montáží a po rozebrání funkčního elektrolyzéry.

V počátečním stavu má tahokovová deska tloušťku 2.45 mm. Deska vymontovaná z elektrolyzéry má tloušťku pouze 2.2 mm. Trvalá deformace je tedy 0.25 mm. Celková plocha desky je čtverec o hraně 45 mm.

Jelikož se nejedná o malé deformace, je pro výpočet poměrné deformace vhodnější použít definici skutečné logaritmické deformace, jak je uvedeno v následující rovnici, viz rovnice (8,9). Kde ε reprezentuje skutečnou deformaci a ϵ značí takzvanou inženýrskou deformaci, která je běžně používána v případě malých deformací. [42]

$$(8) \quad \varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} = \ln \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0} \right) = \ln(1 + \epsilon)$$

$$(9) \quad \epsilon = \ln \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0} \right) = \ln \left(1 + \frac{0,25}{2,45} \right) = 0,0971$$

4.3.2. Určení napětí

Druhou známou hodnotou je síla, kterou je tahokov stlačován. Hodnota je stanovena v momentě, kdy na sebe dolehnou plastové mezipodložky. Do této chvíle jsou stlačovány pouze funkční vrstvy, především právě tahokovová deska. Deformace těchto vrstev je řádově v hodnotách jednotek milimetrů.

Následné stlačování je v jednotkách řádově nižších, jelikož se deformuje výrazně tužší plastová mezideska. Proto pro výpočet tuhosti tahokovové desky vycházíme pouze z hodnot z první fáze stlačování, jelikož předpokládáme, že v druhé fázi už se tahokov zdeformuje pouze nevýznamě. Také v tomto případě se nejedná o malé deformace, je tedy znovu použitý logaritmický výpočet napětí. Výpočet je zobrazen v následujících rovnicích (10,11)

$$(10) \quad \sigma = \sigma_s \left(1 + \epsilon \right) = \frac{F}{A_0} \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0} \right)$$

$$(11) \quad \sigma = \frac{13\,868,56}{45^2} \left(1 + \frac{0,25}{2,45} \right) = 7.5475 \text{ MPa}$$

Výsledný Youngův modul je následně určen z Hookova zákona, viz rovnice (12)

$$(12) \sigma = E \cdot \varepsilon ; E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{7,5475}{0,0971} = 77,67 \text{ MPa}$$

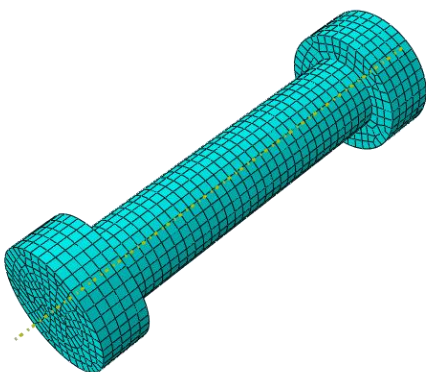
Veškeré použité materiálové vlastnosti jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 5: Materiálové vlastnosti jednotlivých dílů

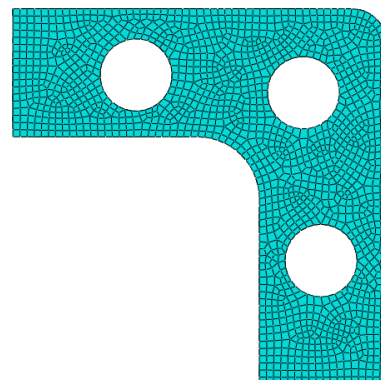
Materiál	Díl	Youngův modul [MPa]	Poissonův poměr [-]
Hliník EN-AW 5083	Koncová deska	70000 [34]	0,33 [35]
Nerezová ocel A2-70	Podložky, šrouby	193000 [36]	0,29 [36]
Plast POM-C	Mezideska	2800 [37]	0,4 [38]
Polykarbonát	Koncová deska	2400 [39]	0,33 [40]
Tahokov	Tahokovová náhrada	77.67	0,3

4.4. Síťování modelu

Stěžejní kapitolou je síťování modelu, které se odehrává v modulu „Mesh“. Kvalita síť poměrně významně ovlivňuje výsledek. Pro tento výpočet je snahou použít co možná nejvíce síť z hexagonálních prvků. Hexagonální prvky totiž nabízí přesnější výsledky, mnohdy za kratší výpočetní čas, než tetragonální prvky. Nevýhoda hexagonálních prvků však tkví v složitějším síťovacím procesu. [43] Pro jednodušší komponenty jako například šrouby (Obrázek 42) nebo plastová mezipodložka (Obrázek 43) není dosažení hexagonální sítě problém.



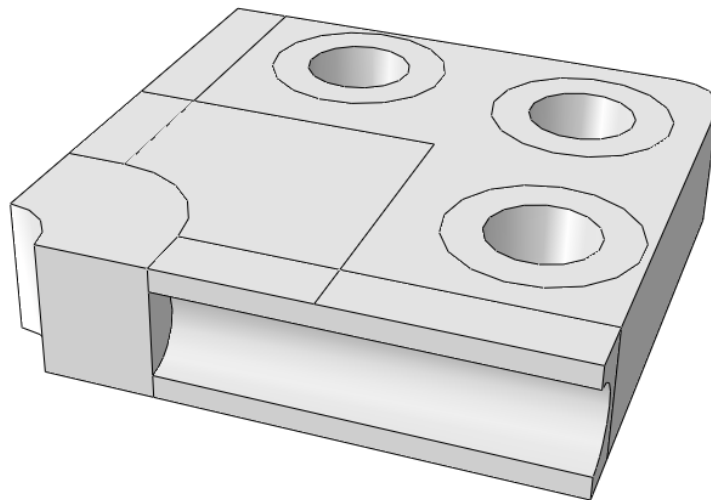
Obrázek 42: Síťování šroubu



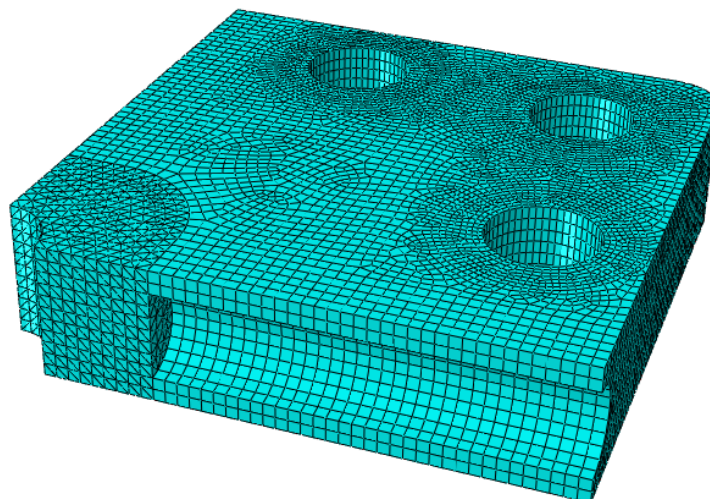
Obrázek 43: Síťování mezidesky

V případě tvarově složitějších prvků, jako jsou koncové desky, ať už hliníkové nebo polykarbonátové, je vhodné sítě docíleno postupným dělením modelu na jednodušší geometrické celky. U obou tvarově složitějších komponent není hexagonálními prvky vysítován celý tvar. Tetragonální prvky jsou použity v co nejmenší možné oblasti tak, aby ideálně co možná nejméně ovlivňovali výsledek.

U hliníkové koncové desky je tvarově složitá část s vrtáním pro topné patrony (Obrázek 44). V samotném síťování pak není možné použít hexagonální prvky v části okolo vrtání pro výstupní konektor (Obrázek 45).



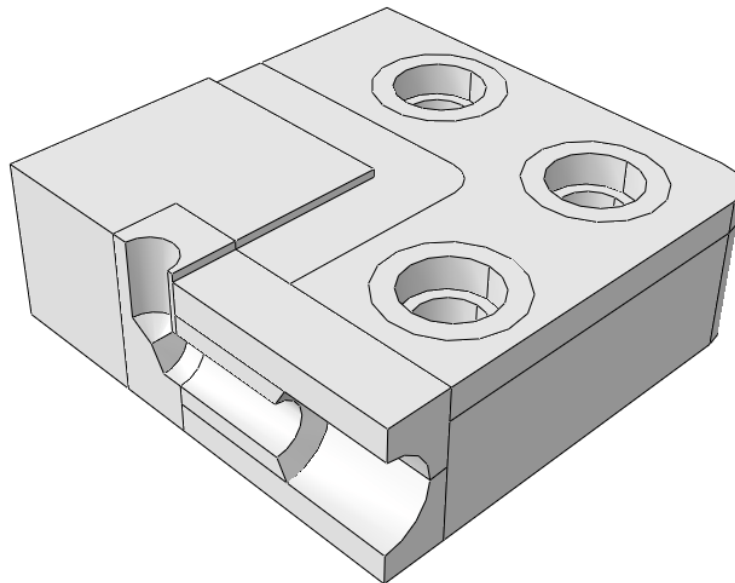
Obrázek 44: Dělení modelu hliníkové koncové pro síťování



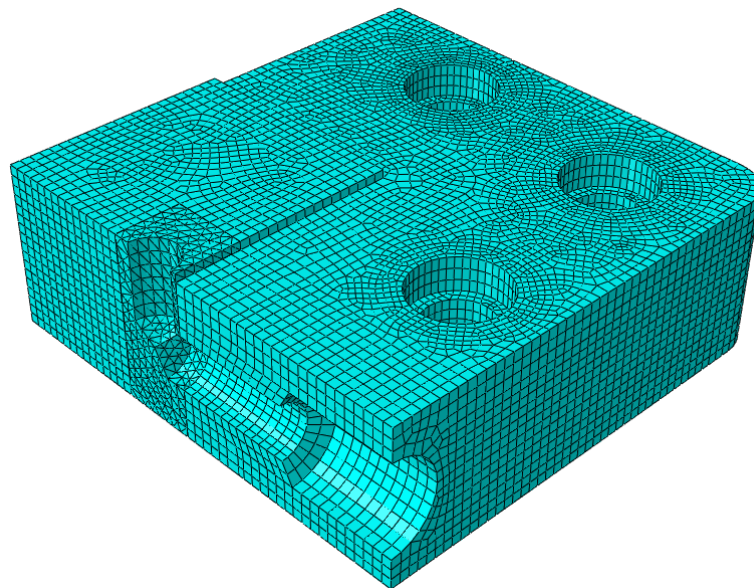
Obrázek 45: Výsledná síť

Tvarově nejsložitější je polykarbonátová koncová deska především kvůli vrtání pro přívod vody. I tento model je tedy nutné postupným dělením rozdělit na menší a jednodušší tvary (Obrázek 46). Opět není možné vysítovat celou část hexagonálními prvky, a právě okolí vrtání pro konektor s přívodem vody je nutné síťovat čtyřstěny (Obrázek 47).

Pro všechny prvky je volena globální síť s aproximativní velikostí v rozmezí 0,6 – 0,9 mm. V případě koncových desek je pak síť zjemněna v okolí děr pro šrouby na velikost 0,5 mm.



Obrázek 46: Dělení modelu polykarbonátové koncové pro síťování



Obrázek 47: Výsledná síť

4.5. Definice kontaktních parametrů

V modulu „Interaction“ je nutné definovat vlastnosti jednotlivých kontaktů úlohy. Vždy bylo použito pro popis kontaktu chování započítávající tření. U každého kontaktu bylo nutné nastavit, která plocha (respektive součást) je řídicí a která podřízená.

Tabulka 6: Vlastnosti kontaktů [41]

Řídicí součást	Podřízená součást	Koeficient tření [-]
Hliníková koncová deska	Plastová mezideska	0,3
Hliníková koncová deska	Tahokovová náhrada	0,6
Podložky	Hliníková tahokovová deska	0,4
Podložky	Polykarbonátová deska	0,5
Polykarbonátová deska	Tahokovová náhrada	0,65
Plastová mezideska	Polykarbonátová deska	0,31

V tomto modulu je rovněž definována vazba mezi hlavou šroubu a podložkou. Jelikož v tomto místě neočekáváme posuv, je možné použít vazbu typu „Coupling“.

4.6. Definice okrajových podmínek

Definice okrajových podmínek vychází z velké části z geometrie úlohy, a sice z jejich zpracování formou čtvrtinového modelu. Všem plochám v řezné rovině je tedy přiřazena okrajová podmínka symetrie, která zakazuje posuv v jednom směru a natočení ve zbylých dvou směrech. Tím je modelu odebráno pět stupňů volnosti, všechny rotace a posuvy ve dvou směrech. Poslední stupeň volnosti byl odebrán vetknutím svrchní plochy hlavy šroubu. Při vyhodnocování výsledků je tedy nutné si uvědomit, že tato vazba konstrukci dodatečně vyztuží. Vazba vetknutím je však zvolena tak, aby bylo nepříznivé zpevnění konstrukce co nejmenší.

4.7. Definice zatížení

Stanovit správné parametry zatížení je pravděpodobně klíčovým prvkem celé deformační analýzy. Otázkou zůstává, jak nastavit zatížení tak, aby odpovídalo reálnému zatěžování elektrolyzéro, a zároveň abychom byli schopni získat konkrétní hodnoty zatížení pro výpočetní software. Nejpřesnější by bylo celý proces vymodelovat tak, jak probíhá ve skutečnosti. Stlačit sestavu konkrétní silou odečtenou z lisu. Sestavu sešroubovat šroubovým polem a následně odstranit původní sílu. To je bohužel v podstatě nereálné, primárně z důvodů nemožnosti popsat chování některých vrstev, zároveň obtížným modelováním přidání šroubů v momentě stlačení celé sestavy.

Výpočetní model je tedy navržen tak, že celá sestava je složena v počátečním stavu a zároveň je rovnou sevřena šroubovým polem. Následně jsou do jednotlivých vrstev vloženy síly, které jsou v reálném zatěžování dodány právě stlačením v lisu.

Hodnoty, ze kterých je vycházeno, jsou hodnoty odečtené z ručního hydraulického lisu, který se používá při montáži vodíkového elektrolyzéro.

První hodnota je stanovena v momentě, kdy na sebe dolehnou plastové mezipodložky. Jedná se o stejnou sílu, která byla použita pro výpočet Youngova modulu tahokovu. Výsledná síla $F_1 = 13\,868,56\text{ N}$ je určena výše, viz rovnice (5).

Druhá hodnota je pak odečtena v momentě, kdy se přestane elektrolyzér stlačovat. Jedná se tedy o maximální sílu, kterou je lis stlačen, $F_2 = 29\,123,98\text{ N}$, viz rovnice (6).

Vzhledem k rozdílným řádům deformací je možné říci, že sestava funkčních vrstev, která je ve výpočetním modelu nahrazena tahokovovou deskou, se primárně deformuje v první fázi stlačování, jelikož se v druhé fázi nijak výrazně nedeformuje. Tím pádem můžeme říct, že do výpočtového modelu principem akce a reakce vnáší sílu $13,9\text{ kN}$, která je generována deformací jednotlivých vrstev, jelikož v druhé fázi stlačení je deformace minimální.

Nárůst síly na lisu je způsoben hlavně deformací plastové mezipodložky, která je řádově tužší než tahokovová mřížka. Můžeme tedy uvažovat, že mezipodložka generuje svou deformací sílu, která je rozdílem výsledné síly a síly tvořené tahokovem. Síla generovaná mezipodložkou je tedy $15,3\text{ kN}$

Do výpočetního modelu v softwaru Abaqus je dané zatížení vloženo zatížením typu „Bolt load“, které je běžně používáno na zadávání předpětí ve šroubech. Tentokrát je však použito v opačném smyslu. Tahokovová deska a plastová mezipodložka mají vlivem zatížení typu „Bolt load“ tendenci se rozpínat právě takovou silou, která je do nich vnesena hydraulickým lisem při montáži.

Výhodou této definice zatížení je fakt, že v takovém případě hodnota Youngova modulu tahokovu, jehož výpočet je patřičně zjednodušen, nehraje v tomto výpočtu tak zásadní roli.

Jedná se o čtvrtinový symetrický model, zadané hodnoty síly jsou patřičně sníženy.

4.8. Výsledky deformační analýzy

V této kapitole jsou představeny výsledky jednotlivých MKP modelací. Pro názornost jsou úlohy rozděleny.

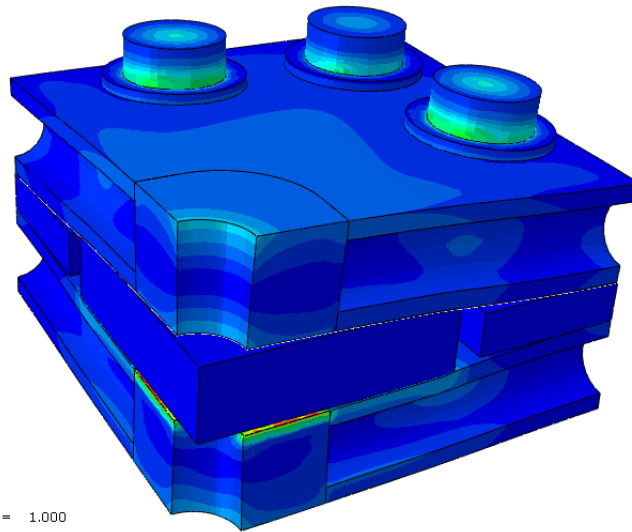
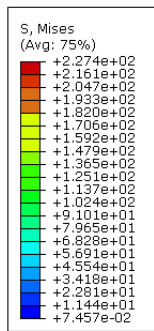
- První úloha porovnává tvarová řešení elektrolyzérů, tedy kruhový a čtvercový elektrolyzér.
- Druhá porovnává vlastnosti edukačního a průmyslového elektrolyzérů.

V obou případech je navržena a spočtena úprava, která by řešila případné nedostatky.

Porovnávané hodnoty vycházejí z funkce elektrolyzérů. Jedná se o celkovou deformaci koncových desek. V případě, že by došlo k moc velkému prohnutí desky, došlo by tím pádem ke zhoršení účinnosti elektrolyzérů. Druhou pozorovanou hodnotou je kontaktní tlak na plastových mezipodložkách, aby elektrolyzér těsnil i v případě, že se poškodí gumové těsnění mezi funkčními plochami a mezipodložkou. Poslední sledovaná veličina je zatížení ve šroubech.

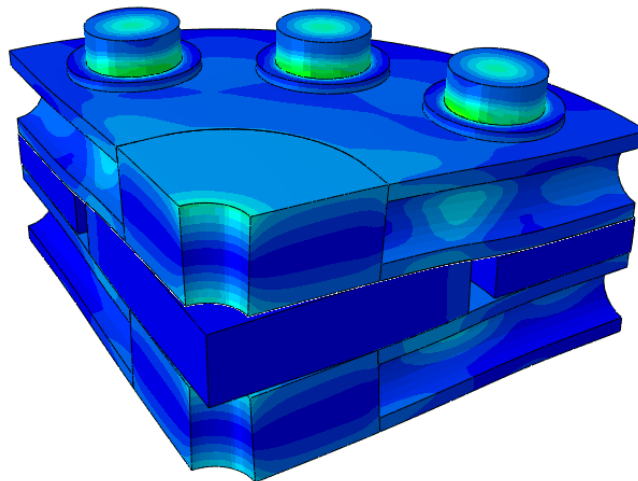
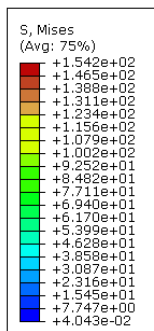
4.8.1. Porovnání různých tvarových řešení elektrolyzérů

Níže jsou uvedeny výsledné zdeformované modely, v obou případech se jedná o vizualizaci napětí „von Mises“ (Obrázek 48), (Obrázek 49). Obecně lze říct že výsledky deformační analýzy jsou v souladu s předpoklady, a sice, že kruhová konstrukce nabízí rovnoměrnější rozložení všech sledovaných veličin. Největšího napětí dosahuje konstrukce v oblasti přechodu mezi hlavou šroubu a podložkou. Šrouby jsou nejvíce deformovány pod hlavou. V tomto místě se nachází maximum napětí, jelikož zde dochází ke kombinaci namáhání tahem a ohybem. Ohyb vzniká při průhybu koncové desky.



Step: Step-1
 Increment 9: Step Time = 1.000
 Primary Var: S, Mises
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +6.176e+01

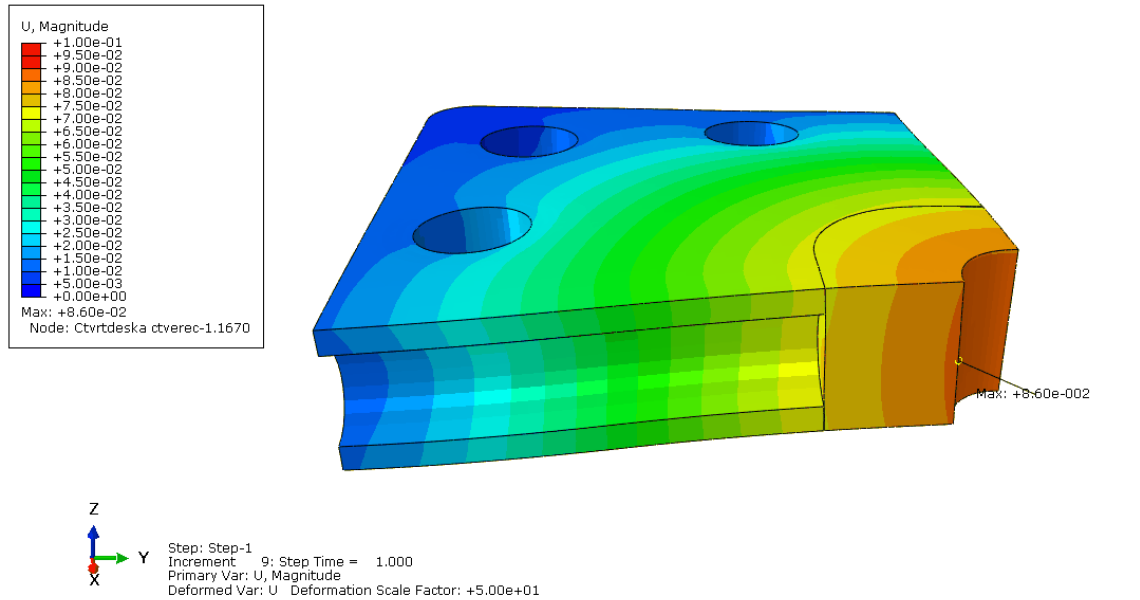
Obrázek 48: Zatížení čtvercové konstrukce



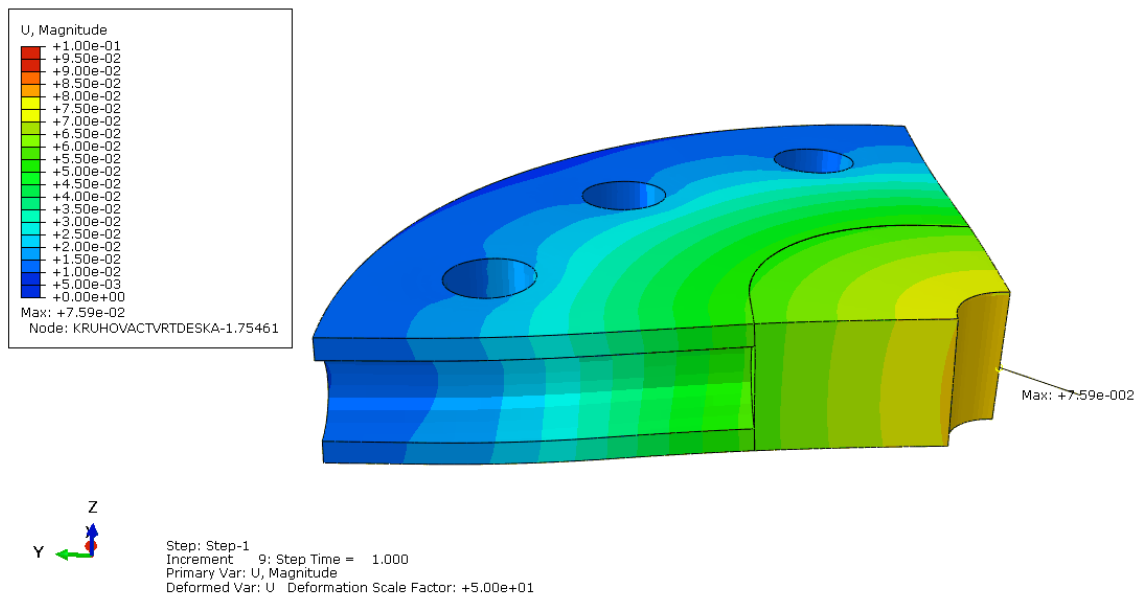
Step: Step-1
 Increment 9: Step Time = 1.000
 Primary Var: S, Mises
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +7.487e+01

Obrázek 49: Zatížení kruhové konstrukce

Při porovnání celkových deformací koncových desek je patrné a předpokládané, že se kruhová deska bude deformovat rovnoměrněji a pravděpodobně tím pádem i méně, vzhledem k tomu, že kruhové rozložení deformace je přirozené. Na čtvercové desce je maximální deformace $0,086\text{ mm}$ (Obrázek 50). Na desce kruhové je deformace nevýznamně nižší a sice $0,076\text{ mm}$ (Obrázek 51).

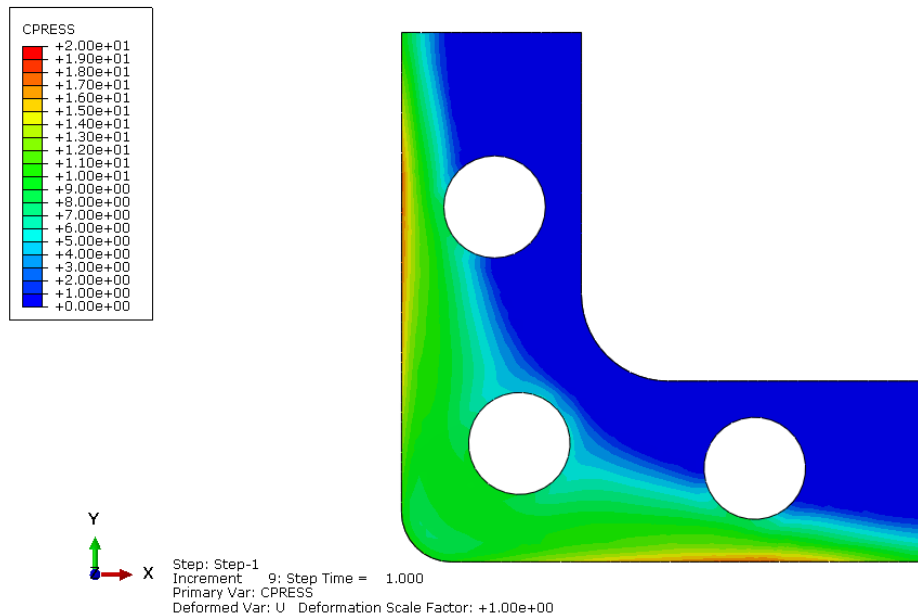


Obrázek 50: Celková deformace čtvercové desky

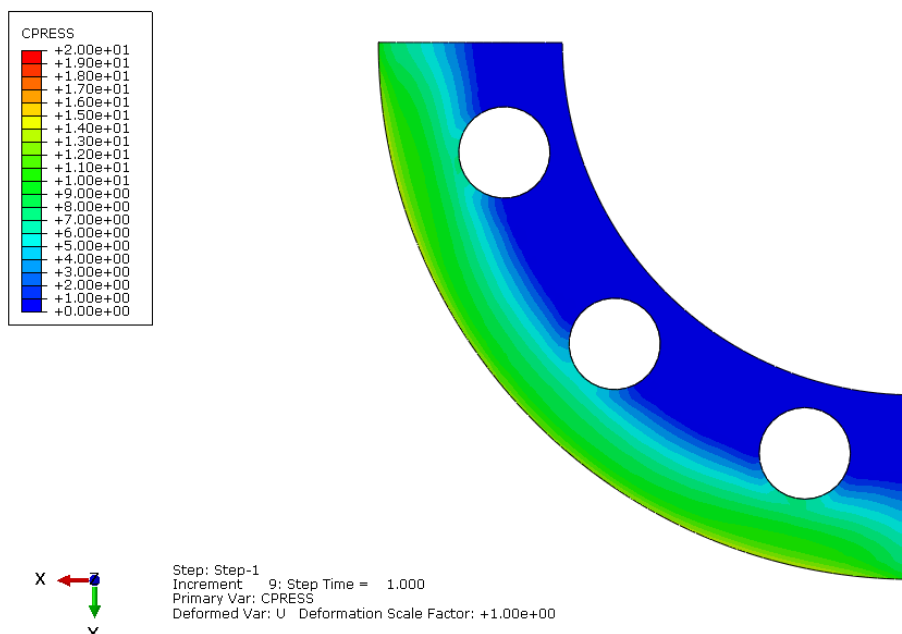


Obrázek 51: Celková deformace kruhové desky

V případě kontaktního tlaku je opět vidět že kruh je přirozený tvar. Jelikož i na čtvercové mezidesce je pole kontaktního tlaku tvořeno kruhy (Obrázek 52). Z toho důvodu je rozložení kontaktního tlaku výrazně více rovnoměrné v případě kruhové koncové desky (Obrázek 53). Modrou barvou je na modelu vyobrazena ta oblast, kde je kontaktní tlak nulový, a došlo tedy k odlehnutí plastové desky od koncové desky elektrolyzéry. V obou případech je hodnota kontaktního tlaku po celém obvodu vyšší než 0,5 MPa, což odpovídá tlaku, kterého může elektrolyzér maximálně uvnitř dosáhnout.

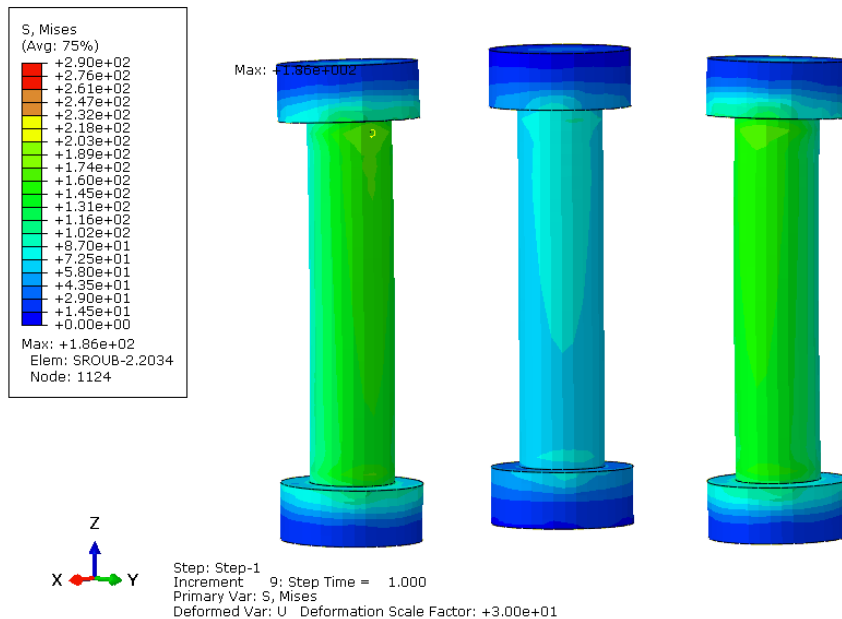


Obrázek 52: Rozložení kontaktního tlaku, čtvercová deska

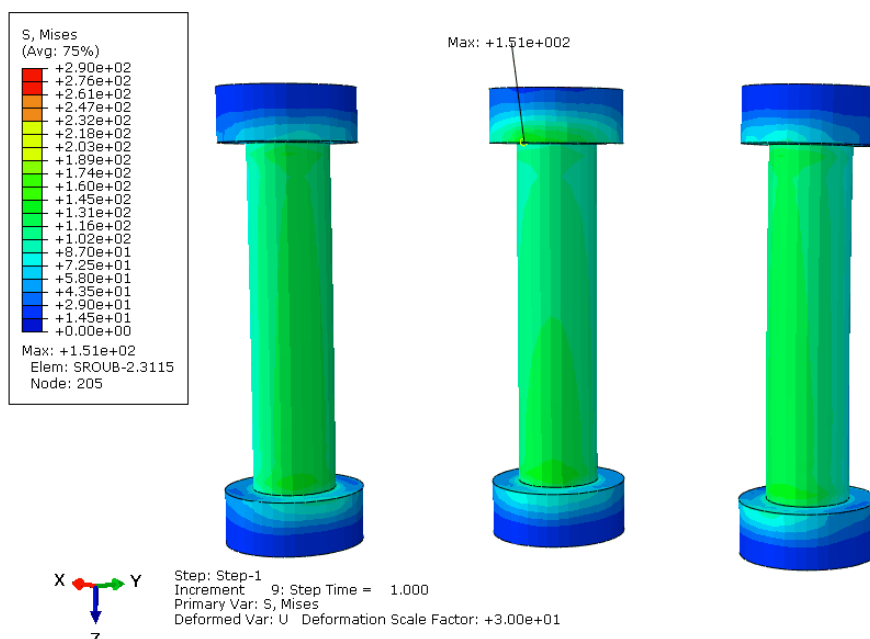


Obrázek 53: Rozložení kontaktního tlaku, kruhová deska

Napětí šroubového pole opět ukazuje, že kruhová konstrukce znamená rovnoměrnost. V případě čtvercové desky, jsou výrazně více namáhány dva krajní šrouby. Maximální hodnota napětí „von Mises“ je v tomto případě 186 MPa (Obrázek 54). Zatímco maximální hodnota napětí „von Mises“ pro kruhovou konstrukci je 151 MPa (Obrázek 55). V případě kruhového šroubového pole je možné pozorovat, že průběh napětí ve šroubech je v podstatě shodný. Oba případy namáhání vyhovují, jelikož mez kluzu pro ocel A2–70 má hodnotu 450 MPa. [36]

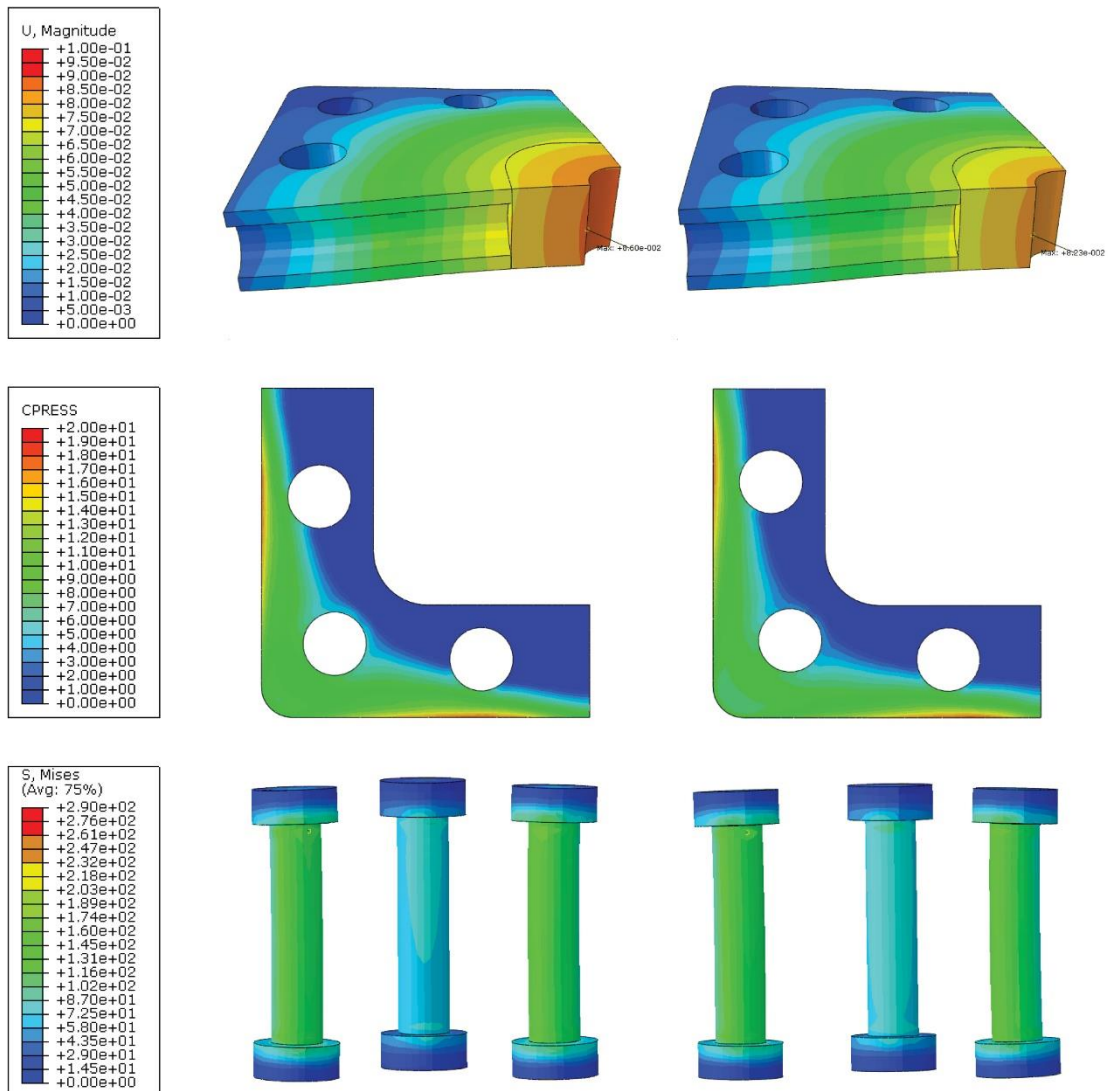


Obrázek 54: Napětí ve šroubovém poli, čtvercové konstrukce, šroub uprostřed je rohový šroub, vetknutý ve výpočetním modelu



Obrázek 55: Napětí ve šroubovém poli, kruhová konstrukce, šroub uprostřed je vetknutý ve výpočetním modelu

Ve snaze odstranit nedostatky čtvercové konstrukce byla navržena konstrukční úprava měnící polohu šroubového pole s požadavkem zlepšení měřených vlastností. Nově navržené šroubové pole se svou polohou více blíží kruhové variantě. Maximální deformace koncové desky je také nižší. V tomto případě je maximální posuv $0,082\text{ mm}$. Rozložení kontaktního tlaku je rovnoměrnější. Napětí ve šroubech je v tomto případě zredukováno na 181 MPa . Vizuální porovnání je zobrazeno níže (Obrázek 56).



Obrázek 56: Porovnání původní varianty (vlevo) a upravené varianty (vpravo)

Pro přehlednost je porovnání upravené varianty zobrazeno v následující tabulce, kde jsou zobrazeny maxima sledovaných veličin pro všechny doposud počítané varianty. Kruhová konstrukce, čtvercová konstrukce a čtvercová konstrukce s upravenou polohou šroubů. Za konkrétní hodnotou je vždy v závorce uvedeno procentuální zhoršení dané veličiny oproti hodnotě kruhové varianty (Tabulka 7).

Tabulka 7: Porovnání první fáze deformační analýzy

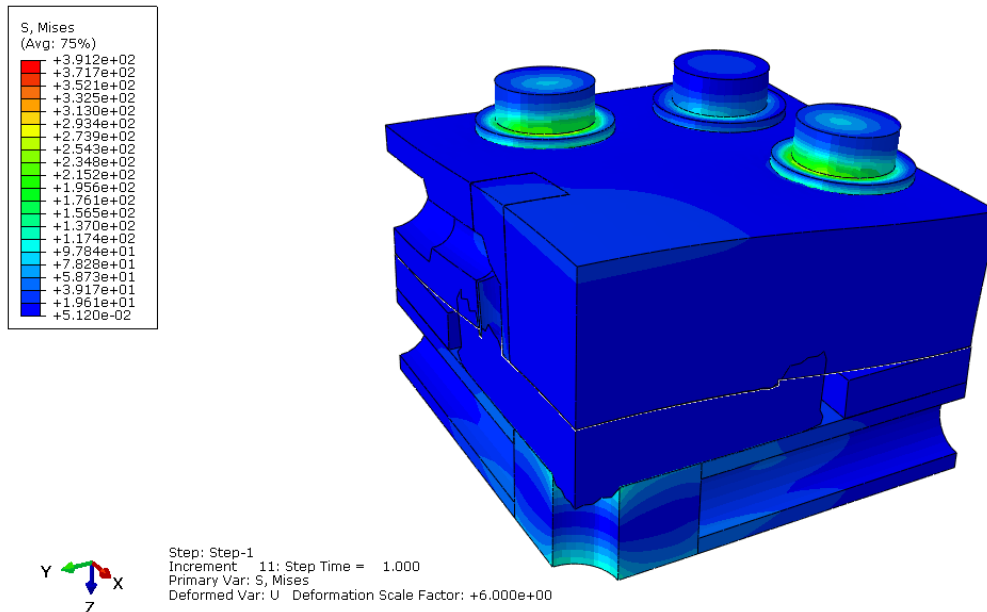
Měřená veličina	Kruhová konstrukce	Čtvercová konstrukce	Upravená čtvercová konstrukce
Maximální deformace desky	0,076 mm	0,086 mm (13.2 %)	0,082 mm (7,9 %)
Maximální napětí „von Miseses“ ve šroubech	151 MPa	186 MPa (23,2 %)	181 MPa (19.9 %)
Maximální hodnota kontaktního tlaku	14,02 MPa	17,82 MPa (27.1 %)	17,69 MPa (26.1 %)

Z deformační analýzy vyplývá, že kruhová varianta nabízí nižší namáhání dílčích součástí. Čtvercová varianta dosahuje ve většině parametrů horších výsledků, zhoršení je řádu nižších desítek procent. Vždy se jedná o zhoršení, které nemá zásadní vliv na výslednou funkčnost elektrolyzéry. Jak je patrné z výše uvedené tabulky, jisté zlepšení nabízí upravená varianta.

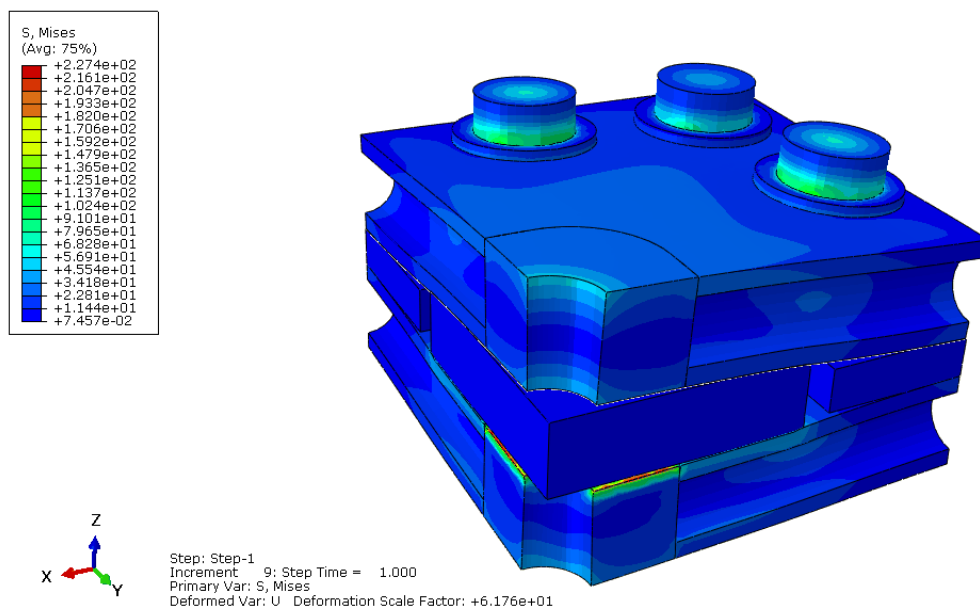
4.8.2. Porovnání průmyslového a edukačního elektrolyzéro

Druhá fáze deformační analýzy se věnuje porovnání deformací, kontaktních tlaků a napětí ve šroubech v případě vodíkového elektrolyzéro s polykarbonátovou koncovou deskou konstruovanou do edukačního prostředí. Vybrané veličiny jsou porovnávány s průmyslovým vodíkovým elektrolyzéro, který společnost LeanCat nabízí.

Zde jsou uvedeny zdeformované modely. Pro oba případy je zde zobrazené napětí „von Mises“ (Obrázek 57), (Obrázek 58).

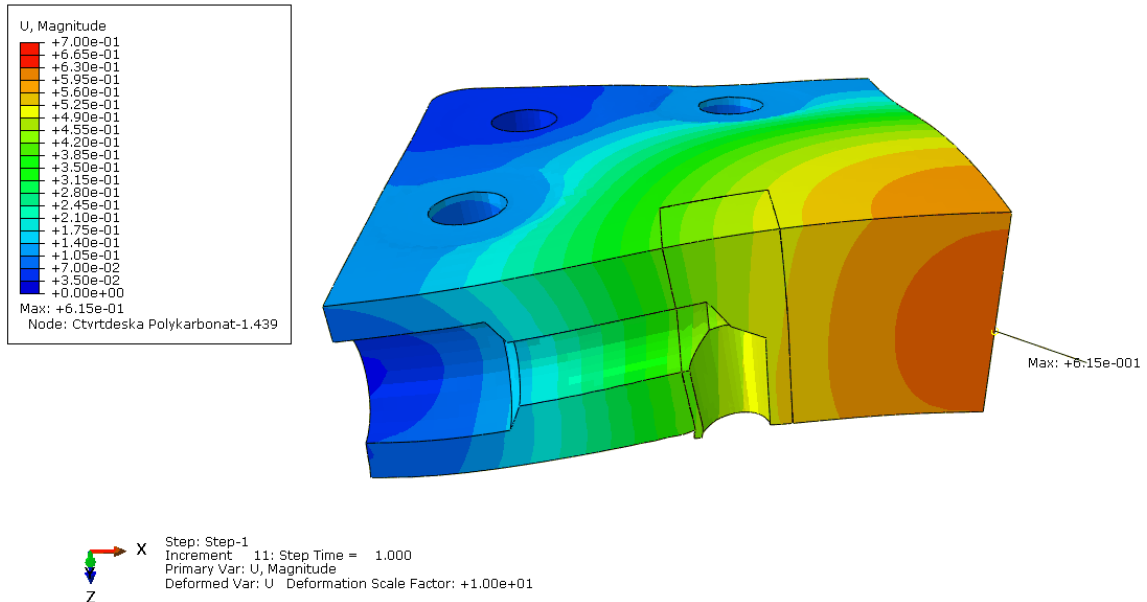


Obrázek 57: Zatížení edukační, polykarbonátové konstrukce

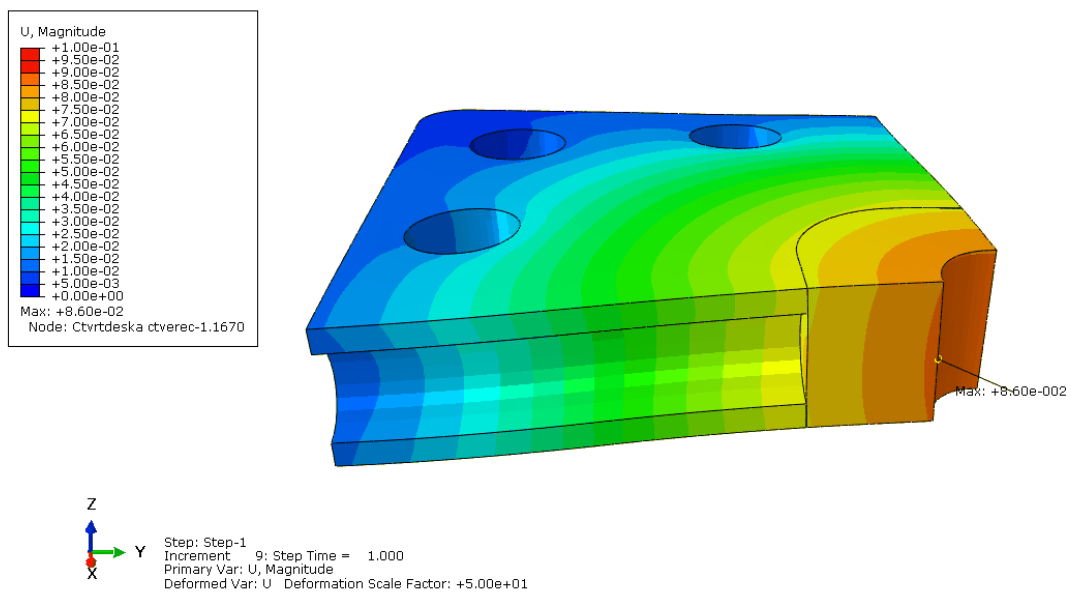


Obrázek 58: Zatížení průmyslové, hliníkové konstrukce

V případě porovnání celkové deformace se potvrzuje, že polykarbonátová deska je vlivem horších pevnostních vlastností materiálu výrazně poddajnější a tím pádem se výrazně více deformuje. Rozdíl deformace je řádový. Maximální deformace polykarbonátové desky je $0,65\text{ mm}$ (Obrázek 59). Zatímco deformace hliníkové desky je pouze $0,086\text{ mm}$ (Obrázek 60).

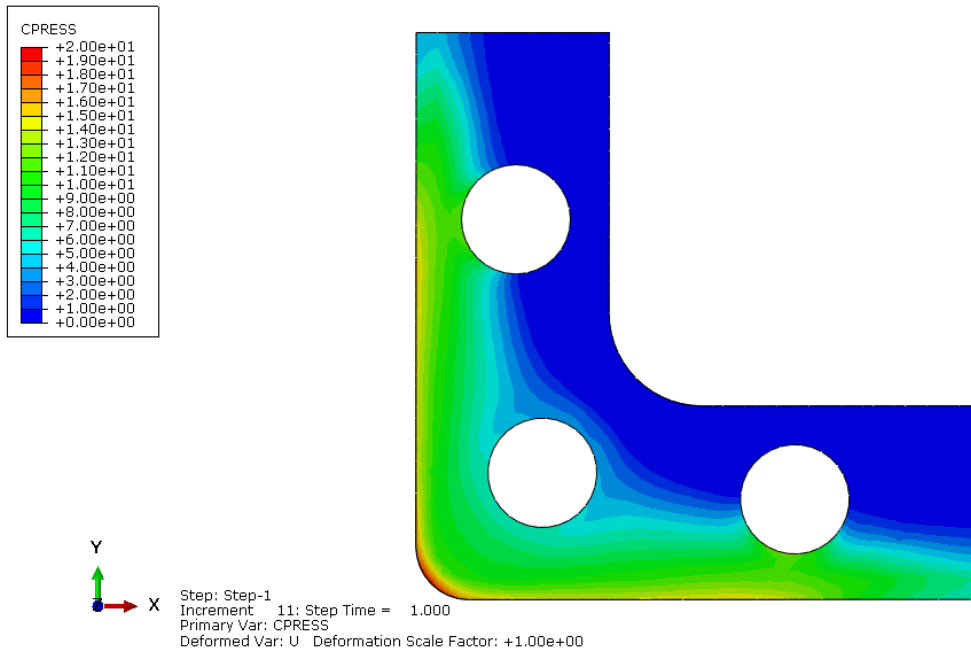


Obrázek 59: Celková deformace polykarbonátové desky

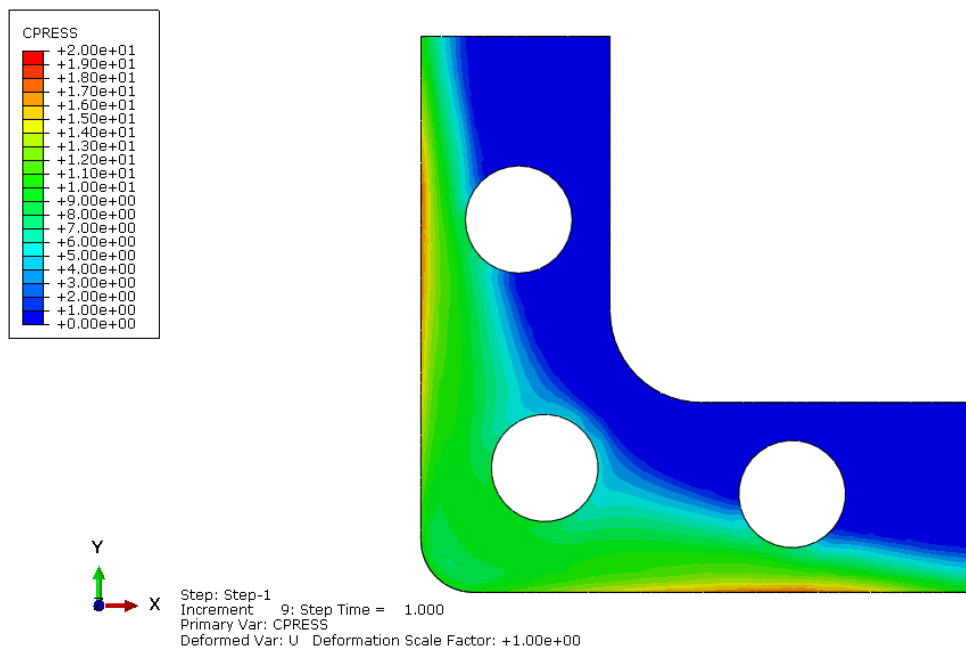


Obrázek 60: Celková deformace hliníkové desky

Kontaktní tlak dosahuje v zásadě podobných hodnot pro oba případy. Za zmínku stojí nesymetrické rozložení hodnot v případě polykarbonátové desky, které je způsobené nesymetrickým modelem. Místo s nižším tlakem je způsobené bočním vrtáním pro přívod vody, mající na následek nižší tuhost desky (Obrázek 61). Tlak v tomto místě dosahuje hodnoty 4 MPa , což by mohlo vést k průsakům v případě relaxace šroubového spoje. Pro porovnání je níže uvedeno rozložení tlaku v případě hliníkové konstrukce (Obrázek 62).

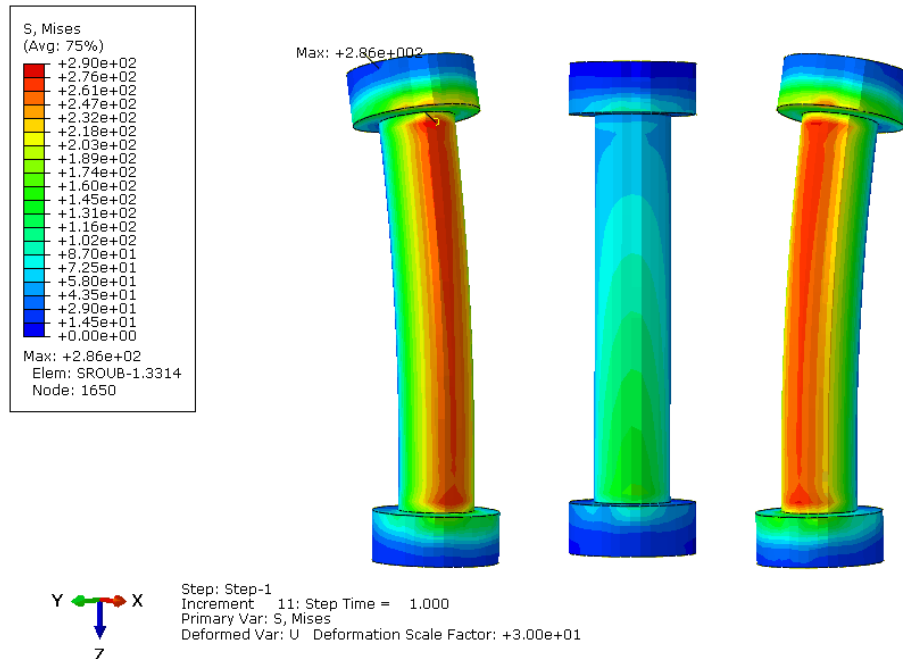


Obrázek 61: Rozložení kontaktního tlaku, polykarbonátová deska

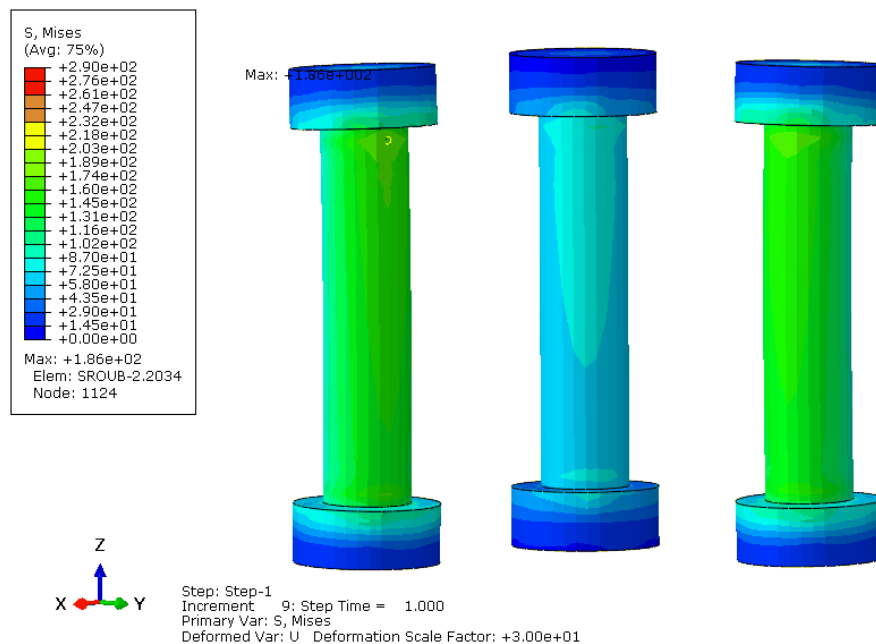


Obrázek 62: Rozložení kontaktního tlaku, hliníková deska

Oproti kontaktnímu tlaku je v případě šroubového pole markantní rozdíl mezi oběma případy. V případě edukačního elektrolyzéry je napětí ve šroubech vyšší, maximálně až 286 MPa (Obrázek 63). Oproti šroubovému poli v případě hliníkové koncové desky (Obrázek 64), jsou jednotlivé šrouby v polykarbonátové desce daleko více zdeformovány, což je zřejmě způsobeno větší funkční délkou.

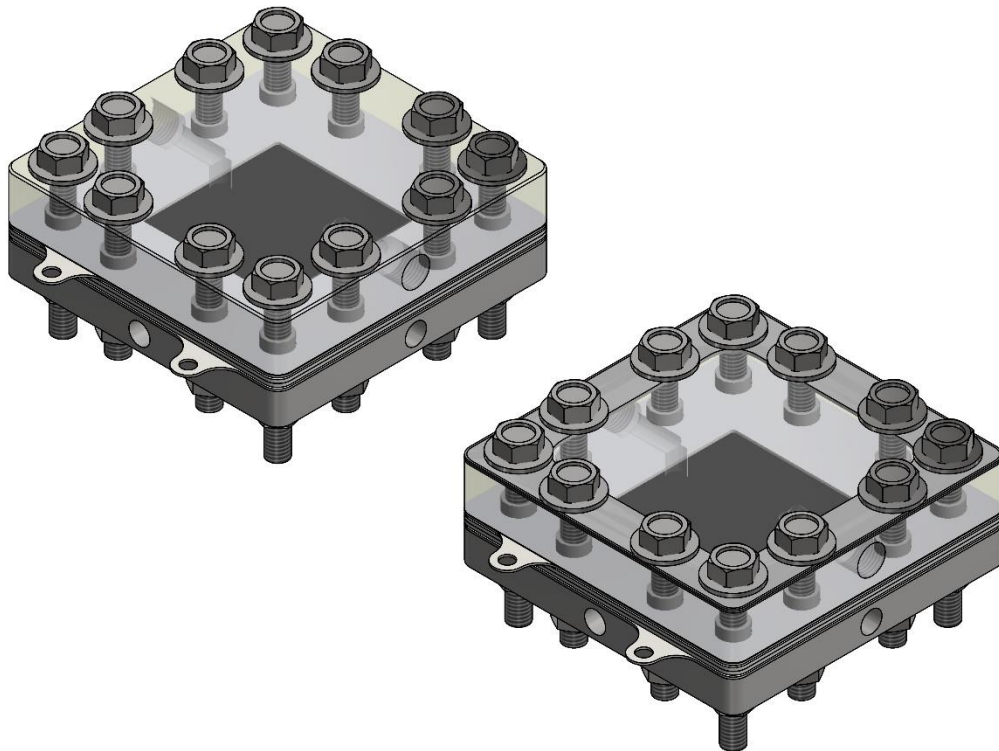


Obrázek 63: Napětí ve šroubovém poli, polykarbonátová deska, šroub uprostřed je rohový šroub, vetknutý ve výpočetním modelu



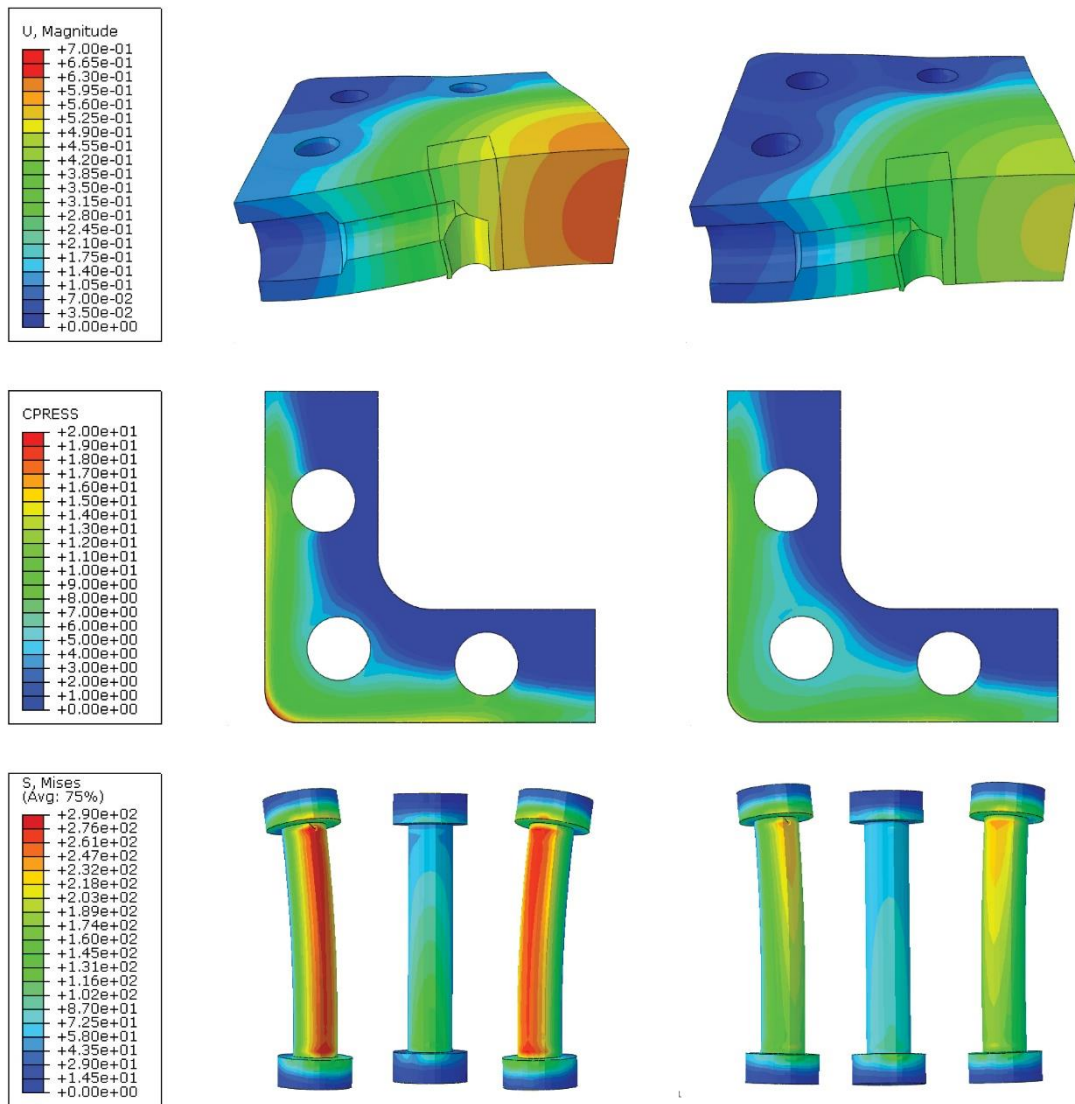
Obrázek 64: Napětí ve šroubovém poli, hliníková deska šroub uprostřed je rohový šroub, vetknutý ve výpočetním modelu

Stejně jako v předchozí úloze i v tomto případě byla navržena úprava, která by mohla pomoci zlepšit vybrané parametry. Tato úprava spočívá v lepším rozložení sil od šroubů, respektive kruhových podložek, do polykarbonátové desky. Právě mezi podložky a koncovou desku je vložena ocelová výztužná deska. Ta způsobuje lepší rozložení sil, což má za následek zlepšení všech hodnocených parametrů. Tvar této desky je patrný na obrázku (Obrázek 65).



Obrázek 65: 3D model elektrolyzérů před konstrukční úpravou (vlevo) a po přidání ocelové výztužné desky (vpravo)

Na následující stránce jsou graficky zobrazeny výsledky této úpravy. Je zde patrná menší celková deformace, lepší rozložení kontaktního tlaku, a nižší napětí ve šroubech (Obrázek 66). Dále je uvedena tabulka porovnávající maximální hodnoty sledovaných veličin na průmyslovém elektrolyzérů hliníkové konstrukce, elektrolyzérů s polykarbonátovou koncovou deskou a elektrolyzérů, kam byla přidána výztužná deska. Tato konstrukční úprava s sebou nese významné zlepšení všech měřených parametrů. Opět je za konkrétní hodnotou vždy v závorce uvedeno procentuální zhoršení dané veličiny oproti hodnotě čtvercové, hliníkové varianty. Výrazné zhoršení je možné pozorovat v případě deformací, jelikož polykarbonátová deska je výrazně méně pevná. Naopak zlepšení je viditelné v případě kontaktního tlaku (Tabulka 8).



Obrázek 66: Porovnání původní varianty (vlevo) a upravené varianty (vpravo), v obou případech se jedná o polykarbonátovou koncovou desku

Tabulka 8: Porovnání druhé fáze deformační analýzy

Měřená veličina	Hliníková konstrukce	Polykarbonátová konstrukce	Polykarbonátová konstrukce s výztuží
Maximální deformace desky	0,086 mm	0,615 mm (615,1 %)	0,504 mm (486,0 %)
Maximální napětí „von Mises“ ve šroubech	186 MPa	286 MPa (53.8 %)	250 MPa (34.4 %)
Maximální hodnota kontaktního tlaku	17,82 MPa	19,09 MPa (7.1 %)	14,57 MPa (-18.2 %)

5. Voltampérová charakteristika

V rámci kontroly funkčnosti byla na finálním produktu (Obrázek 35) naměřena voltampérová charakteristika.

5.1. Důvod měření

Voltampérová charakteristika popisuje závislost mezi napětím a elektrickým proudem daného elektrického zařízení. Cílem měření je tedy ověřit, že se charakteristika edukačního elektrolyzéry podobá charakteristice průmyslového elektrolyzéry.

5.2. Metody měření

Měření probíhalo na edukačním elektrolyzéry společnosti LeanCat (Obrázek 35).

- Teplota je v zařízení měřena pomocí analogového teplotního senzoru.
- Proud je snímán řídicí jednotkou elektrolyzéry.
- Napětí je následně měřeno V-sense měřidlem.

Díky topným patronám umožňuje zařízení nastavitelný ohřev cirkulující vody. Z toho důvodu je měřených charakteristik více, každá pro jinou teplotu. Pro porovnání je připojena voltampérová charakteristika průmyslového elektrolyzéry dodané společností LeanCat

5.3. Výsledky měření

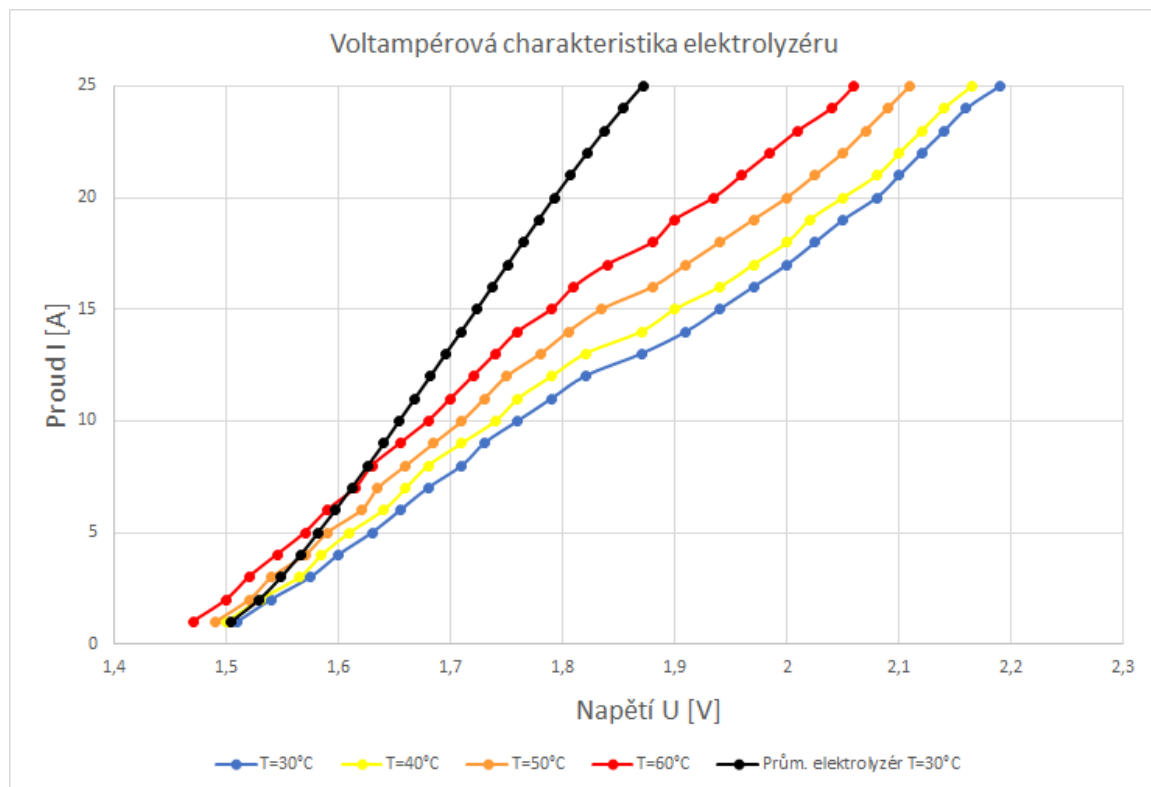
Tabulka 9: Hodnoty pro VA charakteristiku

Proud I/A	Napětí U/V				
	T=30°C	T=40°C	T=50°C	T=60°C	Prům. elektrolyzér T=30°C
25	2,19	2,165	2,11	2,06	1,8715
24	2,16	2,14	2,09	2,04	1,854
23	2,14	2,12	2,07	2,01	1,8375
22	2,12	2,1	2,05	1,985	1,822
21	2,1	2,08	2,025	1,96	1,807
20	2,08	2,05	2	1,935	1,7925
19	2,05	2,02	1,97	1,9	1,7785
18	2,025	2	1,94	1,88	1,7645
17	2	1,97	1,91	1,84	1,751
16	1,97	1,94	1,88	1,81	1,737
15	1,94	1,9	1,835	1,79	1,7235
14	1,91	1,87	1,805	1,76	1,7095
13	1,87	1,82	1,78	1,74	1,6955
12	1,82	1,79	1,75	1,72	1,682
11	1,79	1,76	1,73	1,7	1,668
10	1,76	1,74	1,71	1,68	1,654
9	1,73	1,71	1,685	1,655	1,6405
8	1,71	1,68	1,66	1,63	1,626
7	1,68	1,66	1,635	1,615	1,6115
6	1,655	1,64	1,62	1,59	1,597
5	1,63	1,61	1,59	1,57	1,5815
4	1,6	1,585	1,57	1,545	1,566
3	1,575	1,565	1,54	1,52	1,5485
2	1,54	1,53	1,52	1,5	1,529
1	1,51	1,5	1,49	1,47	1,504

5.4. Závěr měření

Na voltampérové charakteristice (Obrázek 67) je patrné, že se stoupající teplotou se křivka edukačního elektrolyzéro přibližuje černě zobrazené křivce průmyslového elektrolyzéro. Lze zároveň říct, že se tak zvyšuje účinnost elektrolyzéro. Produkce vodíku je přímo úměrná protékajícímu proudu. Produkce vodíku pro elektrolyzér o funkční ploše 2500 mm^2 při proudu 25 A odpovídá $187,5 \text{ ml/min}$. [44]

V případě průmyslového elektrolyzéro je pro takovou produkci zapotřebí napětí $1,8715 \text{ V}$ což odpovídá výkonu $46,8 \text{ W}$. V případě edukačního elektrolyzéro při teplotě vody $30 \text{ }^\circ\text{C}$ je zapotřebí napětí $2,19 \text{ V}$, výkon je tím pádem roven $54,8 \text{ W}$. Můžeme tedy říci, že průmyslovému elektrolyzéro stačí nižší výkon pro tvorbu stejného množství vodíku, a má tedy vyšší účinnost. Edukační elektrolyzér dosahuje nižší účinnosti a pro tvorbu stejného množství vodíku potřebuje o $17,1 \%$ vyšší výkon.



Obrázek 67: Voltampérová charakteristika

6. Závěr

V rámci této diplomové práce je navržen a sestaven vodíkový elektrolyzátor do edukačního prostředí. Návrh vychází z požadavků zadaných společností LeanCat. Jedná se o elektrolyzátor, který si dává za cíl studentům co nejvíce přiblížit vodíkové technologie, zejména pak elektrolyzu vodíku pomocí PEM membrány. Pro konstrukční návrh je rovněž zpracována deformační analýza. Na základě výsledků této analýzy jsou navrženy konstrukční úpravy zlepšující daný návrh.

Rešerše je rozdělena na tři části. První se zabývá technologií produkce vodíku se zaměřením na elektrolyzu, jelikož primárně tyto technologie mohou přinést významnou změnu v užití obnovitelných zdrojů energie. Podrobně je popsána elektrolyza využívající technologii protonově vodivé membrány, jelikož právě tato technologie je použita v navrhovaném vodíkovém elektrolyzátoru.

Druhá část rešerše se týká principů edukačních přístrojů a zařízení. Jsou zde stanoveny základní principy, které pomáhají k lepšímu pochopení dané problematiky.

Poslední část rešerše je věnována edukačním zařízením představující právě vodíkovou technologii.

Následující část této práce je věnována představení konkrétní konstrukce vodíkového elektrolyzátoru. V této části je představena volba materiálů, konstrukční řešení celého zařízení s ohledem na výrobu komponent na 3D tiskárně nebo tvarové úpravy pro správnou funkci elektrolyzátoru. Hliníková koncová deska je nahrazena polykarbonátovou deskou. Především z toho důvodu, aby bylo vidět na funkční vrstvy. Zároveň jsou navrženy dva 3D tištěné boxy. Jeden na řídicí elektroniku, obsahující mimo jiného vypínací tlačítko a ovládací displej. Druhý box obsahuje nádrž na vodu a odlučovač.

Předposlední fáze práce se zabývá deformační analýzou vodíkového elektrolyzátoru. Zde je popsán postup tvorby výpočtového modelu, od tvarového zjednodušení přes určování materiálových vlastností jednotlivých komponent, až po definici zatížení. Následně jsou představeny výsledky jednotlivých výpočetních modelací. Výsledky jsou rozděleny do dvou úloh. V první je porovnáváno tvarově rozlišné řešení. Kruhové řešení nabízí přirozenější rozklad sil, ale při jeho výrobě vzniká větší množství odpadního materiálu. Rozložení sil je v případě čtvercového elektrolyzátoru nepatrně horší, ovšem při výrobě vzniká daleko méně odpadu. Druhá úloha porovnává edukační, polykarbonátový elektrolyzátor s průmyslovým, hliníkovým elektrolyzátor. Zde je opět vidět že polykarbonát je výrazně poddajnější materiál a vyhodnocované parametry dosahují horších výsledků. Pro obě úlohy bylo navrženo a spočteno vhodnější provedení, které řeší případné nedostatky dané konstrukce.

Seznam použité literatury

- [1] SHIVA KUMAR, S. a V. HIMABINDU. Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies*. 2019, 2(3), 442-454. ISSN 25892991. Dostupné z: doi:10.1016/j.mset.2019.03.002
- [2] Hustota energie - Energy density. Encyklopedie [online]. Wikipedia, 2021, 2021 [cit. 2022-06-01]. Dostupné z: https://wikijii.com/wiki/Energy_density
- [3] CARMO, Marcelo, David L. FRITZ, Jürgen MERGEL a Detlef STOLTEN. A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2013, 38(12), 4901-4934 [cit. 2022-03-20]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2013.01.151
- [4] M. Foteini Sapountzi, M. Jose Gracia, C.J. (Kees-Jan) Weststrate, O.A. Hans Fredriksson, J.W. (Hans) Niemantsverdriet, *Electrocatalysts for the generation of hydrogen, oxygen and synthesis gas*, *Prog. Energy Combust. Sci.* 58 (2017) 1–35.
- [5] PEM water electrolysis materials. We are tpf hydrogen products [online]. [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.tfphydrogen.com/products/pem-water-electrolysis-materials>
- [6] LI, Gendi, Junbo ZHOU a Yong LIU. Comparison between hydrogen production by alkaline water electrolysis and hydrogen production by PEM electrolysis. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* [online]. 2019, 371(4) [cit. 2022-06-01]. ISSN 1755-1307. Dostupné z: doi:10.1088/1755-1315/371/4/042022
- [7] SELAMET, Ömer Faruk, Fatih BECERIKLI, Mahmut D. MAT a Yüksel KAPLAN. Development and testing of a highly efficient proton exchange membrane (PEM) electrolyzer stack. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2011, 36(17), 11480-11487 [cit. 2022-06-01]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2011.01.129
- [8] Titan EZ-2000 Stack. Fuel Cell Store [online]. Fuel Cell Store, 2019 [cit. 2022-06-01]. Dostupné z: <https://www.fuelcellstore.com/hydrogen-equipment/hydrogen-production-electrolyzers/pem-electrolyzer-stacks/pem-electrolyzer-cell-stack-titan-2000>
- [9] Alkaline Water Electrolyzer Stack - 10 Cell. Fuel Cell Store [online]. Fuel Cell Store, 2021 [cit. 2022-06-01]. Dostupné z: <https://www.fuelcellstore.com/alkaline-water-electrolyzer-stack-10-cell>
- [10] Solid Oxide Electrolyser Cell. H2e Power [online]. h2e Power, 2021 [cit. 2022-06-01]. Dostupné z: <https://www.h2epower.net/solid-oxide-electrolyser-cell/>
- [11] Solid Oxide Electrolyser Cell. H2e Power [online]. h2e Power, 2021 [cit. 2022-06-01]. Dostupné z: <https://www.h2epower.net/solid-oxide-electrolyser-cell/>
- [12] HydroBot Arm Kit. Elenco [online]. Elenco electronics, 2019 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://shop.elenco.com/consumers/hydrobot-arm-kit.html>
- [13] STEM Mechanics: Gears & Worm Drivers. Elenco [online]. Elenco electronics, 2019 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://shop.elenco.com/consumers/stem-mechanics-gears-worm-drives.html>

- [14] Gas Vertical Engine Stirling. Eachine [online]. 2021 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.eachine.com/Eachine-ETX-Hit-and-Miss-Gas-Vertical-Engine-Stirling-Engine-Model-Upgraded-Version-Water-Cooling-Cycle-Engine-Collection-p-2142.html>
- [15] PRIME Solar Powered Racing Car Kit. TN Trade [online]. [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: https://www.tntrade.cz/produkty-prime-solar-powered-racing-car-kit-detail-9690?gclid=CjwKCAjwoduRBhA4EiwACL5RP__puSzwSrpvW4TnKmT0DPx0j1hrwrtqi ybeBdLLxcFj0lxKkljfwxoc3hwQAvD_BwE
- [16] Hydraulic Plane Launcher. Elenco [online]. Elenco electronics, 2019 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://shop.elenco.com/consumers/hydraulic-plane-launcher.html>
- [17] Snap Circuits. Elenco [online]. Elenco electronics, 2019 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://shop.elenco.com/consumers/snap-circuits-jr-100-experiments.html>
- [18] Solar4STEM 200 Solar Generator. Solar4STEM [online]. [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <http://www.solar4stem.com/store/p1/200.html>
- [19] Single electrolyzer. H-tech education [online]. H-tech education [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://h-tec-education.com/education-kits/electrolyzer-kits/electrolyser-cell-5-htec-e103>
- [20] PEM Blue Electrolyzer - 1 unit. Horizon Educational [online]. Horizon Fuel Cell Europe, 2022 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.horizoneducational.com/pem-blue-electrolyzer-1-unit/p1173>
- [21] 1-Cell Rebuildable PEM Electrolyzer Kit. Fuel Cell Store [online]. Fuel Cell Store, 2022 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.fuelcellstore.com/fuel-cell-education-products/1-cell-rebuildable-pem-electrolyzer-kit-htec-e208>
- [22] Electrolyzer 65. H-tech education [online]. H-tech education [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://h-tec-education.com/education-kits/electrolyzer-65-htec-e206>
- [23] Solar Hydrogen Science Kit. Horizon Educational [online]. Horizon Fuel Cell Europe, 2022 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.horizoneducational.com/solar-hydrogen-science-kit/p1224>
- [24] DIY Fuel Cell Science Kit. Horizon Educational [online]. Horizon Fuel Cell Europe [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.horizoneducational.com/diy-fuel-cell-science-kit/p1457>
- [25] Fyzikální vlastnosti materiálů. PlasticExpress [online]. plasticexpres, <https://plasticexpress.cz/> [cit. 2022-06-20]. Dostupné z: <https://plasticexpress.cz/fyzikalni-vlastnosti>
- [26] ŠNAJDR ING., Roman. Stavební sklo – materiály, výrobky a konstrukce. Tzbinfo [online]. 23.8.2019 [cit. 2022-06-20]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/zaskleni/19463-stavebni-sklo-materialy-vyrobky-a-konstrukce>
- [27] Polymethylmethakrylát. PolyPLASTY [online]. 2015 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.polyplasty.cz/polymethylmethakrylat.html>

- [28] SOVA, Miloš. Vlastnosti Polykarbonátu. TECHportal [online]. Praha: Verlag Dashöfer, 1997, 6.3.2015 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.techportal.cz/33/vlastnosti-polykarbonatu-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EqQUkSFod1Gx-NUTUHRb7JY/>
- [29] Plexisklo a plný polykarbonát: čím se odlišují, jak s nimi zacházet. PlasticExpress [online]. Ostrava: Dotinum, 5. 5. 2021 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://plasticexpress.cz/n-78/plexisklo-a-plny-polykarbonat-cim-se-odlisuji-jak-s-nimi-zachazet>
- [30] BUDINSKÁ, Zuzana, Petr DUCHÁČEK, Zdeněk KOHOUT a Miroslav JÍLEK. Fyzika I. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2020. ISBN 978-80-01-06673-7.
- [31] Láhev širokohrdlá hranatá PVC a PETG čirá | KAUTEX. P-LAB [online]. P-LAB, 2022 [cit. 2022-06-01]. Dostupné z: <https://www.p-lab.cz/lahev-sirokohrdla-hranata-pvc-a-petg-cira-kautex>
- [32] Plovákový senzor vodní hladiny, vodorovný. Laska Kit [online]. LaskaKit, 2022 [cit. 2022-06-01]. Dostupné z: https://www.laskakit.cz/plovakovy-senzor-vodni-hladiny-vodorovny/?gclid=Cj0KCQjw1tGUBhDXARIsAIJx01mBCXFg42AcGhQKSpnBYCSl6CJ3H74POB4q-6ZG-Mm6YVfUkgZMyTgaAtDKEALw_wcB
- [33] Water Electrolyser Science Kit LCWE-Kit. LEANCAT: We Make Hydrogen Technology Reality [online]. Praha: LeanCat, 2022 [cit. 2022-06-01]. Dostupné z: <https://www.lean-cat.com/water-electrolyser-science-kit-lcwe-kit/>
- [34] Aluminium Alloys - Aluminium 5083 Properties, Fabrication and Applications. AZO materials [online]. AZOnetwork, 2000, 19.4.2005 [cit. 2022-06-01]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2804>
- [35] Aluminum 5083-H116; 5083-H321. ASM: Aerospace Specification Metals [online]. MatWeb [cit. 2022-06-01]. Dostupné z: <https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=ma5083h116>
- [36] AISI Type 304 Stainless Steel. ASM: Aerospace Specification Metals [online]. MatWeb [cit. 2022-06-01]. Dostupné z: <https://midlandbrightsteels.co.uk/portfolio/special-steels/a2-70/>
- [37] POLYOXYMETHYLENOVÉ DESKY, POM-C, ČERNÁ. E-SHOP MULTIPLAST [online]. Titan-multiplast, 2022 [cit. 2022-06-01]. Dostupné z: <https://www.multiplast.cz/eshop/pom-materialy-89/polyoxymethylenove-desky-pom-c-cerna-998?fbclid=IwAR0UCwlv4Jmth8PhsVjMqW26lOLMaHLjb3HiSBmokyf2caE8w-KR9PTEVBo>
- [38] TYPICAL POISSON'S RATIOS OF POLYMERS AT ROOM TEMPERATURE. Polymerdatabase [online]. polymerdatabase.com, 2022 [cit. 2022-06-01]. Dostupné z: <https://polymerdatabase.com/polymer%20physics/Poisson%20Table2.html>
- [39] SOVA ING., Miloš. Vlastnosti polykarbonátu. TECH portál [online]. Dashöfer Holding, 1997, 6.3.2015 [cit. 2022-06-01]. Dostupné z: <https://www.techportal.cz/33/vlastnosti-polykarbonatu-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EqQUkSFod1Gx-NUTUHRb7JY/>

- [40] Polycarbonate (PC) - Conductive Polycarbonate - Properties - Supplier Data by Goodfellow. AZO materials [online]. AZOnetwork, 2000 [cit. 2022-06-01]. Dostupné z: <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=2008>
- [41] Friction: Friction Coefficients and Calculator. Engineering ToolBox [online]. 2004 [cit. 2022-06-01]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html
- [42] DUB, Bc. Martin. Identifikace parametrů tvárného porušení materiálu OC15CH při vyšších rychlostech zatěžování. Praha, 2012. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
- [43] BENZLEY, Steven E., Ernest PERRY, Karl MERKLEY, Brett CLARK a Greg SJAARDAMA. A Comparison of All Hexagonal and All Tetrahedral Finite Element Meshes for Elastic and Elasto-Plastic Analysis. Proceeding: 4th international meshing roundtable. 1995, (17), 179-191.
- [44] ATLAM, Ozcan a Mohan KOLHE. Equivalent electrical model for a proton exchange membrane (PEM) electrolyser. Energy Conversion and Management [online]. 2011, 52(8-9), 2952-2957 [cit. 2022-06-21]. ISSN 01968904. Dostupné z: [doi:10.1016/j.enconman.2011.04.007](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.04.007)

Seznam obrázků

Obrázek 1: Možnosti výroby vodíku, převzato a upraveno z [1]	11
Obrázek 2: AWE schéma [1]	12
Obrázek 3: SOE schéma [1].....	12
Obrázek 4: PEM schéma [5].....	13
Obrázek 5: Jednotlivé části PEM elektrolyzéro [7]	15
Obrázek 6: PEM elektrolyzér [8]	16
Obrázek 7: Alkalický elektrolyzér [9]	16
Obrázek 8: SOE elektrolyzér [11]	17
Obrázek 9: Hydraulicky ovládaná pohyblivá ruka [12]	18
Obrázek 10: Stirlingův motor [14]	19
Obrázek 11: Model solárního vozu [15].....	20
Obrázek 12: Odpalovací rampa [16]	20
Obrázek 13: Stavebnice elektrických obvodů [17]	21
Obrázek 14: Sestava pro experimenty se solární energií [18]	21
Obrázek 15: Elektrolyzér, H-TEC [19].....	22
Obrázek 16: Elektorlyzér, Horizon educational [20].....	22
Obrázek 17: Znovusestavitelný elektrolyzér [21]	23
Obrázek 18: Schéma znovusestavitelného elektrolyzéro [21].....	23
Obrázek 19: Elektrolyzérová sada, H-TEC [22].....	24
Obrázek 20: Sada s použitím reversibilního elektrolyzéro [23]	25
Obrázek 21: Vodíková studentská sada [24]	26
Obrázek 22: Studentské modely vodíkových vozidel [24]	26
Obrázek 23: Původní a upravený tvar anody.....	28
Obrázek 24: Řešení vzniknuvší mezery.....	29
Obrázek 25: Vrtání pro konektory	30
Obrázek 26: Elektrolyzér s polykarbonátovou koncovou deskou.....	30
Obrázek 27: Vrtání pro topné patроны	31
Obrázek 28: Box pro elektrolyzér a řídicí elektroniku	32
Obrázek 29: Kryt ventilátoru	33
Obrázek 30: Rámeček pro displej	33
Obrázek 31: Elektrolyzér s boxem pro elektroniku.....	33
Obrázek 32: Sada širokohrdlých lahví [31]	34
Obrázek 33: Plovákový senzor [32].....	34
Obrázek 34: Blok pro nádrž a odlučovač	35
Obrázek 35: Výsledný vodíkový elektrolyzér pro edukační účely [33]	36
Obrázek 36: Detail na samotný vodíkový elektrolyzér [33].....	36
Obrázek 37: Tři různá konstrukční řešení pro deformační analýzu: Polykarbonátová deska (vlevo), čtvercová hliníková deska (uprostřed), kruhová hliníková deska (vpravo)	37
Obrázek 38: Schéma sestavení komponent vodíkového elektrolyzéro, první fáze	38
Obrázek 39: Schéma sestavení komponent vodíkového elektrolyzéro, druhá fáze	39
Obrázek 40: Schéma sestavení komponent vodíkového elektrolyzéro, třetí fáze	40
Obrázek 41: Výpočtový 3D model v softwaru Abaqus	41
Obrázek 42: Síťování šroubu.....	43
Obrázek 43: Síťování mezidesky	43
Obrázek 44: Dělení modelu hliníkové koncové pro síťování	44
Obrázek 45: Výsledná síť	44
Obrázek 46: Dělení modelu polykarbonátové koncové pro síťování.....	45
Obrázek 47: Výsledná síť	45
Obrázek 48: Zatížení čtvercové konstrukce.....	49
Obrázek 49: Zatížení kruhové konstrukce	49
Obrázek 50: Celková deformace čtvercové desky	50

Obrázek 51: Celková deformace kruhové desky.....	50
Obrázek 52: Rozložení kontaktního tlaku, čtvercová deska	51
Obrázek 53: Rozložení kontaktního tlaku, kruhová deska	51
Obrázek 54: Napětí ve šroubovém poli, čtvercové konstrukce, šroub uprostřed je rohový šroub, vetknutý ve výpočetním modelu	52
Obrázek 55: Napětí ve šroubovém poli, kruhová konstrukce, šroub uprostřed je vetknutý ve výpočetním modelu	52
Obrázek 56: Porovnání původní varianty (vlevo) a upravené varianty (vpravo)	53
Obrázek 57: Zatížení edukační, polykarbonátové konstrukce	55
Obrázek 58: Zatížení průmyslové, hliníkové konstrukce	55
Obrázek 59: Celková deformace polykarbonátové desky	56
Obrázek 60: Celková deformace hliníkové desky	56
Obrázek 61: Rozložení kontaktního tlaku, polykarbonátová deska	57
Obrázek 62: Rozložení kontaktního tlaku, hliníková deska	57
Obrázek 63: Napětí ve šroubovém poli, polykarbonátová deska, šroub uprostřed je rohový šroub, vetknutý ve výpočetním modelu	58
Obrázek 64: Napětí ve šroubovém poli, hliníková deska šroub uprostřed je rohový šroub, vetknutý ve výpočetním modelu	58
Obrázek 65: 3D model elektrolyzéry před konstrukční úpravou (vlevo) a po přidání ocelové výztužné desky (vpravo)	59
Obrázek 66: Porovnání původní varianty (vlevo) a upravené varianty (vpravo), v obou případech se jedná o polykarbonátovou koncovou desku	60
Obrázek 67: Voltampérová charakteristika	63

Seznam tabulek

Tabulka 1: Porovnání energetických hustot vybraných prvků.....	8
Tabulka 2: Porovnání technologií výroby vodíku, přeloženo a upraveno z [3]	14
Tabulka 3: Porovnání PEM a alkalický elektrolyzéry [8],[9].....	16
Tabulka 4: Porovnání pevností v tlaku vybraných materiálů.....	27
Tabulka 5: Materiálové vlastnosti jednotlivých dílů	43
Tabulka 6: Vlastnosti kontaktů [41]	46
Tabulka 7: Porovnání první fáze deformační analýzy	54
Tabulka 8: Porovnání druhé fáze deformační analýzy	60
Tabulka 9: Hodnoty pro VA charakteristiku.....	62

Seznam příloh

Příloha 1: Sestavný výkres 01 Stack
Příloha 2: Výrobní výkres 01 Seznam částí
Příloha 3: Výrobní výkres 001 Koncová deska – voda polykarbonat
Příloha 4: Výrobní výkres 002 Koncová deska – vodík hliník
Příloha 5: Výrobní výkres 003 Kolektor katoda
Příloha 6: Výrobní výkres 004 Kolektor anoda
Příloha 7: Výrobní výkres 005 Plastová mezideska
Příloha 8: Výrobní výkres 006 Tahokovová vrstva – ptl
Příloha 9: Výrobní výkres 007 Protonově vodivá membrána
Příloha 10: Výrobní výkres 008 Těsnění
Příloha 11: Výrobní výkres 009 Izolace anoda
Příloha 12: Výrobní výkres 010 Izolace šroubu
Příloha 13: Výrobní výkres 011 Podložka pod šroubové pole
Příloha 14: 3D model sestavy navrženého elektrolyzéry