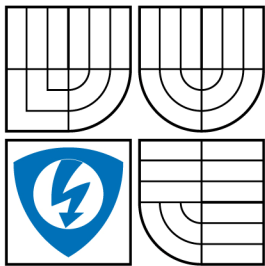


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
TECHNOLOGY**

NOVÉ TYPY MEMBRÁN PRO ELEKTROLYZÉR VODÍK - KYSLÍK

NEW TYPES MEMBRANES FOR ELECTROLYZER HYDROGEN - OXYGEN

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JIŘÍ HÝBL

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MIROSLAV KUNOVJÁNEK

BRNO 2010

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Jiří Hýbl
Bytem: Kahlikova 3, Zábřeh, 789 01
Narozen/a (datum a místo): 20.9.1983, Šumperk

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
Ing. Miroslav Kunovjánek
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
- diplomová práce
- bakalářská práce
- jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

.....
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Nové typy membrán pro elektrolyzér vodík - kyslík
Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Miroslav Kunovjánek
Ústav: Ústav elektrotechnologie
Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

- tištěné formě – počet exemplářů 2
- elektronické formě – počet exemplářů 2

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt:

Tato práce se zabývá výrobou vodíku a kyslíku elektrolýzou. Cílem práce bylo proměřit různé typy membrán a vybrat nejlepší pro použití v elektrolyzáru vodík - kyslík. Vlastnosti membrán byly ověřeny v laboratorním elektrolyzáru při krátkodobém i dlouhodobém provozu. Vzniklé plyny z elektrolyzáru byly následně měřeny na plynovém chromatografu, aby se zjistila čistota vyrobeného vodíku. Současně jsou také testovány různé koncentrace KOH elektrolytu a jejich vliv na účinnost elektrolyzáru.

Abstract:

This work deals with the production of hydrogen and oxygen by electrolysis. Aims of this thesis are to measure different types of membranes and choose the best for use in electrolyzer for hydrogen and oxygen production. Properties of membranes were tested in the laboratory electrolyzer in the short and long operation. The emerging gases from electrolyzer were also tested on a gas chromatograph to determine the purity of produced hydrogen. At the same time are also tested different concentrations of KOH electrolyte and the effect of concentrations on efficiency of electrolyzer.

Klíčová slova:

Vodík, Kyslík, Elektrolyzáru, Elektrolýza, Membrána, Elektrody

Keywords:

Hydrogen, Oxygen, Electrolyser, Elektrolyse, Membrane, Electrode

Bibliografická citace díla:

HÝBL, J. Nové typy membrán pro elektrolyzér vodík - kyslík. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 53 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Miroslav Kunovjánek.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 27. 5. 2010

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Miroslavu Kunovjánkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále děkuji Doc. Ing. Marii Sedlařkové, Csc. za pomoc a důležité rady při měření na chromatografu.

OBSAH

OBSAH	6
1 Úvod	9
2 Vlastnosti vodíku a kyslíku	11
2.1 Vodík.....	11
2.2 Kyslík.....	13
3 Elektrolýza.....	14
3.1 Příklady elektrolýzy	16
3.2 Faradayovy zákony elektrolýzy	18
3.3 Vlastnosti elektrolýzy.....	18
3.4 Spotřeba elektrolyzéro	19
4 Plynová chromatografie	21
5 Konstrukce elektrolyzéro.....	23
5.1 Elektrody.....	23
5.1.1 Zapojení elektrod.....	23
5.2 Elektrolyt.....	25
5.3 Konstrukční desky.....	25
5.3.2 Konstrukční deska elektrolyzéro	25
5.4 Membrány	26
5.4.1 Heterogenní iontoměničové membrány RELAX®	26
5.4.2 Membrány od Brněnské továrny plstí.....	30
5.4.3 Membrány DuPont	31
6 Měření vlastností elektrolýzy	32
6.1 Vliv vzdálenosti elektrod na potenciál	32
6.2 Krátkodobá elektrolýza	33
Bez výměny elektrolytu.....	33
S výměnou elektrolytu.....	34
Měření s membránami	35
6.3 Dlouhodobá elektrolýza	36
7 Měření na plynovém chromatografu	39
8 Stanovení účinnosti	45
9 Závěr	47
10 Literatura	48
Příloha 1:	50

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Vybrané fyzikálně-chemické vlastnosti vodíku [10].....	11
Tab. 2: Vlastnosti membrán RELAX [®] [4].....	28
Tab. 3: Membrána PDC 95 [7]	30
Tab. 4: Membrána VPK PES/SOL [7]	30
Tab. 5: Membrána FIT POP I [8]	30
Tab. 6: Membrána FIT POP II [8]	31
Tab. 7: Membrána FIT PES II [8]	31
Tab. 8: Membrána KAV V [8]	31
Tab. 9: Srovnání výsledků z chromatografu pro všechny membrány	44
Tab. 10: Výpočet účinnosti pro membránu PDC 95 s 1 M roztokem KOH.....	45
Tab. 11: Výpočet účinnosti pro membránu PDC 95 s 5 M roztokem KOH.....	45

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Zdroje na výrobu vodíku [6]	12
Obr. 2: Rozkladné napětí [11]	15
Obr. 3: Princip zapojení elektrolyzéry	15
Obr. 4: Schéma plynového chromatografu [14]	22
Obr. 5: Schéma zapojení elektrolyzéry	23
Obr. 6: Monopolární zapojení elektrod	24
Obr. 7: Bipolární zapojení elektrod	24
Obr. 8: Konstrukční deska elektrolyzéry.....	25
Obr. 9: Elektrolyzér	26
Obr. 10: Změna potenciálu v závislosti na posunu elektrody	32
Obr. 11: Závislost potenciálu na vzdálenosti elektrod	33
Obr. 12: Závislost potenciálu na době elektrolýzy bez výměny elektrolytu	34
Obr. 13: Závislost potenciálu na době elektrolýzy s výměnou elektrolytu	34
Obr. 14: Závislost potenciálu na době elektrolýzy s membránami	35
Obr. 15: Závislost potenciálu na době elektrolýzy pro 1 M KOH pro měřené membrány	36
Obr. 16: Závislost potenciálu na době elektrolýzy pro 5 M KOH pro měřené membrány	37
Obr. 17: Srovnání 1 M a 5 M roztoku KOH pro membránu PDC 95	37
Obr. 18: Chromatogram pro membránu PDC 95	39
Obr. 19: Detail 1 pro membránu PDC 95.....	39
Obr. 20: Detail 2 pro membránu PDC 95.....	40
Obr. 21: Chromatogram pro membránu VPK PES/SOL	40
Obr. 22: Detail 1 pro membránu VPK PES/SOL.....	41
Obr. 23: Detail 2 pro membránu VPK PES/SOL.....	41
Obr. 24: Chromatogram pro membránu FIT PES II	42
Obr. 25: Detail 1 pro membránu FIT PES II.....	42
Obr. 26: Detail 2 pro membránu FIT PES II.....	43
Obr. 27: Graf účinnosti 1 M a 5 M roztoku KOH.....	46
Obr. 28: Závislost potenciálu na čase pro membránu SONTARA	50
Obr. 29: Závislost potenciálu na čase pro membránu VPK PES/SOL.....	50
Obr. 30: Závislost potenciálu na čase pro membránu KAV V.....	51
Obr. 31: Závislost potenciálu na čase pro membránu FIT POP I.....	51
Obr. 32: Závislost potenciálu na čase pro membránu FIT POP II	52
Obr. 33: Závislost potenciálu na čase pro membránu FIT PES II.....	52
Obr. 34: Závislost potenciálu na čase pro membránu AMH5E-HD	53

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

U_R	rozkladné napětí
I	elektrický proud
R	odpor elektrolytu
m	hmotnost vyloučené látky
A	elektrochemický potenciál
t	doba trvání elektrolýzy
M_m	molární hmotnost látky
F	Faradayova konstanta
z	počet elektronů na vyloučení jedné molekuly plynu
M_{H_2}	molární hmotnost vodíku
M_{O_2}	molární hmotnost kyslíku
U_{rov}	rovnovážné napětí
ΔG^0_{298}	Gibbsova energie při teplotě 298 K a tlaku 101,325 kPa
n	počet výměnných nábojů
ΔH^0_{298}	standardní molová entalpie při teplotě 298 K a tlaku 101,325 kPa
Q_t	teoretická spotřeba el. náboje pro výrobu 1 m ³ vodíku a 0,5 m ³ kyslíku
W_t	teoretická spotřeba energie pro výrobu 1 m ³ vodíku a 0,5 m ³ kyslíku
K	konstrukční deska
E	elektroda
U	napětí na elektrolyzéru
W_s	skutečně spotřebovaná energie na výrobu 1 m ³ vodíku a 0,5 m ³ kyslíku
η	účinnost elektrolyzéru

1 Úvod

Lidé využívají energii v každém odvětví a pro dnešní dobu se stala nepostradatelnou součástí života. Spotřeba energie má proto čím dál vzrůstající tendenci. Energie je v současnosti převážně získávána z fosilních paliv – ropy, zemního plynu a uhlí a také jaderným štěpením. Fosilní zdroje jsou ale vyčerpatelné a neobnovitelné. V blízké době hrozí jejich nedostatek, proto je potřeba hledat nové zdroje, které by byly co možná nejekonomičtější a nejekologičtější. Problém jaderného štěpení je v uložení vyhořelého paliva.

Fosilní paliva obsahují uhlík a jejich hořením se vytváří obrovské množství oxidu uhličitého, který znečišťuje naši atmosféru. V důsledku hromadění oxidu uhličitého dochází ke globálnímu oteplování a vytváření skleníkového efektu.

Vodík je jedním z mála paliv, které lze považovat za palivo budoucnosti. Nalézá se všude a jeho zásoby jsou nevyčerpatelné. Hlavní výhody vodíku jsou, že je netoxický, nevytváří skleníkové plyny, je bezuhlíkový a bezpečný při správném skladování. Mezi nevýhody vodíku patří vysoké výrobní náklady a také, že ve směsi se vzduchem je silně výbušný.

Vodík lze vyrábět několika způsoby. V současnosti dominuje výroba parním reformingem, což je metoda, kde základní surovina reaguje za vysoké teploty a tlaku s vodní parou za vzniku oxidu uhličitého, oxidu uhelnatého a vodíku. Nejvhodnější surovinou pro tento proces je zemní plyn. Tento proces má vysokou efektivitu a nízké provozní a výrobní náklady. Další možný postup výroby vodíku je parciální oxidací ropných frakcí, kde se surovina zplyňuje kyslíkem a vodní parou při vysokých teplotách a tlaku. U těchto metod výroby vodíku je nevýhodou, že se používají uhlovodíkové suroviny, což má vliv na zvyšující se emise oxidu uhličitého, pokud se vypouštějí přímo do atmosféry. Vodík lze také vyrábět z elektřiny pomocí elektrolýzy, kde se zároveň s vodíkem vytváří kyslík.

Tato práce se zabývá výrobou vodíku a kyslíku elektrolýzou. Elektrolýza bude probíhat v elektrolyzáru, který se skládá z elektrod, konstrukčních desek a membrán, které slouží k oddělení vznikajících plynů. Požadavky na membrány jsou jejich nepropustnost pro vznikající plyny a dostatečná pevnost a stálost v alkalickém prostředí. Membrána musí být také iontově vodivá. Tyto požadavky splňují komerčně vyráběné membrány, např. Nafion, jejichž cena je však vysoká a neúměrně by zvedla cenu koncového zařízení.

Cílem práce je najít a proměřit takové materiály, které budou vhodné pro použití v elektrolyzáru a budou cenově dostupnější, než jsou komerčně vyráběné membrány.

Postupně budou proměřovány různé typy membrán, jednak netkané textilie od různých výrobců a také komerčně dostupné membrány RELAX[®] od firmy MEGA a.s. ze

Stráže pod Ralskem. Ze všech těchto membrán bude vybrána nejvhodnější pro použití v elektrolyzéru.

Vzniklý vodík je analyzován na plynovém chromatografu, aby se zjistilo, zda neobsahuje příměs kyslíku, což by znamenalo, že je membrána pro plyny propustná. Současně jsou také testovány různé koncentrace elektrolytu KOH a jejich vliv na účinnost elektrolyzéru.

Základní chemické prvky, které vznikají při elektrolýze, jsou popsány ve druhé kapitole. Třetí kapitola se zabývá základními vlastnostmi elektrolýzy a principem zapojení elektrolyzéru. Čtvrtá kapitola pojednává o plynové chromatografii. Pátá kapitola se věnuje konstrukci elektrolyzéru a jeho jednotlivými částmi. Šestá kapitola se zabývá měřením vlastností na elektrolyzéru. V sedmé kapitole je provedeno měření na plynovém chromatografu a v osmé kapitole se stanovuje účinnost elektrolýzy.

2 Vlastnosti vodíku a kyslíku

2.1 Vodík

Vodík je bezbarvý, bez chuti, zápachu, lehký plyn velmi hořlavý. Vodík je za normální teploty stabilní, při zahřátí je značně reaktivnější. Vodík vytváří sloučeniny se všemi prvky periodické tabulky s výjimkou vzácných plynů [1].

Tab. 1: Vybrané fyzikálně-chemické vlastnosti vodíku [10]

Parametr	Jednotka	Hodnota
Chemické označení		H ₂
Molární hmotnost	g.mol ⁻¹	2,0158
Hustota kapalné fáze při -259,2 °C a 0,1 MPa	kg.m ⁻³	70,8
Hustota plynné fáze při 20 °C a 0,1 MPa	kg.m ⁻³	0,0838
Relativní hustota plynné fáze (vzduch = 1)		0,0696
Bod varu	°C	-252,8
Bod tání	°C	-259,2
Výhřevnost (kapalná fáze)	MJ.kg ⁻¹	120,05
Výhřevnost (plynná fáze)	MJ.m ⁻¹	10,79
Dolní mez výbušnosti s vzduchem	% obj.	4
Horní mez výbušnosti s vzduchem	% obj.	75
Dolní mez výbušnosti s kyslíkem	% obj.	4
Horní mez výbušnosti s kyslíkem	% obj.	95

Vodík je schopen tvořit zvláštní typ chemické vazby, nazývaný vodíková vazba nebo také vodíkový můstek, kdy vázaný atom vodíku vykazuje afinitu i k dalším atomům, s nimiž není poután klasickou chemickou vazbou. Mimořádně silná je vodíková vazba s atomy kyslíku, což vysvětluje anomální fyzikální vlastnosti vody (vysoký bod varu a tání atd.) [1].

V přírodě se elementární vodík vyskytuje jen vzácně, nejvíce v blízkosti sopek. Plynný vodík se v našem prostředí vyskytuje ve formě dvouatomových molekul H₂ v mezihvězdném prostoru je přítomen jako atomární vodík H, v zemské atmosféře se vyskytuje jen ve vyšších vrstvách [1].

Ze sloučenin je nejvíce zastoupena voda, která pokrývá 2/3 zemského povrchu. Další významný zdroj vodíku představují organické sloučeniny [1].

Vodík je základním stavebním prvkem celého vesmíru, vyskytuje se jak ve všech svítících hvězdách, tak v mezgalaktickém prostoru [1].

Vodík má tři izotopy:

Vodík

Klasický atom vodíku (někdy nazývaný protium), tvořený jedním protonem a jedním elektronem. Tento izotop je nejjednodušší atom ve vesmíru a tvoří jeho převažující část [1].

Deuterium

Atom s jádrem ^2H , který obsahuje v jádře jeden proton a jeden neutron se od běžného vodíku liší atomovou hmotností. Někdy označován chemickou značkou D. Deuterium je stabilní izotop, který nepodléhá radioaktivní přeměně.

V přírodě se vyskytuje vedle lehkého vodíku. V průměru připadá jeden atom deuteria na 7000 atomů vodíku. Ve spojení s kyslíkem tvoří deuterium těžkou vodu D_2O . Sloučenina se využívá v jaderném průmyslu [1].

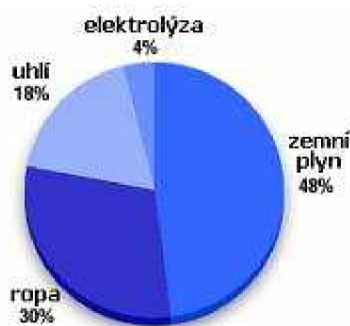
Tritium

Je izotop ^3H , který má jádro složeno z jednoho protonu a 2 neutronů, někdy označován chemickou značkou T. Na rozdíl od deuteria je jádro tritia nestabilní a rozpadá se s poločasem rozpadu 12,4 roku za vyzáření málo energetického beta záření.

V přírodních podmínkách vzniká tritium především v horních vrstvách atmosféry při kolizi kosmického záření s jádrem atomu deuteria. Uměle je tritium získáváno v těžkovodních jaderných reaktorech při výrobě plutonia z přírodního uranu. Tritium slouží jako jedna složka náplně termonukleární bomby [1].

Výroba vodíku:

Vodík se může vyrábět mnoha způsoby z širokého spektra vstupních zdrojů. V současnosti dominuje výroba vodíku z fosilních paliv. Viz následující obrázek [6].



Obr. 1: Zdroje na výrobu vodíku [6]

2.2 Kyslík

Kyslík je plynný chemický prvek, tvořící druhou hlavní složku zemské atmosféry. Kyslík je velmi reaktivní permanentní plyn. Slučování kyslíku s ostatními prvky se nazývá hoření. Jde vždy o exotermní reakci, která vede k uvolnění značného množství tepelné a světelné energie. Produkty hoření se nazývají oxidy. Teplota tání kyslíku je $-218,79\text{ }^{\circ}\text{C}$, teplota varu je $-182,95\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2].

Na Zemi je kyslík velmi rozšířeným prvkem. V atmosféře tvoří plynný kyslík 21 objemových %. Voda oceánů, která pokrývá 2/3 zemského povrchu je hmotnostně složena z 90 % kyslíku. V zemské kůře je kyslík majoritním prvkem, je téměř ve všech horninách. Jeho obsah je odhadován na 46 – 50 hmotnostních %. V hlubších vrstvách zemského tělesa zastoupení kyslíku klesá a předpokládá se, že v zemském jádře je přítomen pouze ve stopách. Ve vesmíru je zastoupení kyslíku podstatně nižší [2].

Ve svých sloučeninách se kyslík vyskytuje převážně v mocenství O^{2-} , výjimečně jako O^{1-} a O^{1+} a také $\text{O}^{1/2-}$ v superoxidech [2].

Kyslík se výlučně vyrábí destilací zkapalněného vzduchu. Vyrobený kyslík se uchovává buď ve zkapalněném stavu ve speciálních Dewarových nádobách, nebo plynný v ocelových tlakových nádobách. Vzhledem k vysoké reaktivitě čistého kyslíku je nezbytné, aby se nedostal do přímého kontaktu s organickými látkami. Proto se všechny součásti aparatury pro uchovávání a manipulaci s kapalným nebo stlačeným kyslíkem nesmí mazat žádnými organickými tuky nebo oleji [2].

Kromě obvyklých dvouatomových molekul O_2 se kyslík vyskytuje i ve formě tříatomové molekuly jako ozón O_3 [2].

3 Elektrolýza

Elektrolýza je fyzikálně chemický děj, způsobený průchodem elektrického proudu kapalinou, při kterém dochází k chemickým změnám na elektrodách [3].

Elektricky vodivá kapalina obsahuje směs kladných a záporných iontů vzniklých disociací. Průchodem elektrického proudu dochází k pohybu kladných iontů k záporné elektrodě a záporných iontů ke kladné elektrodě. Na elektrodách pak může docházet k chemickým reakcím – mezi ionty a elektrodou, mezi ionty samotnými nebo mezi ionty a kapalinou (díky vyšší koncentraci iontů u elektrody) [3].

Chemické změny, které probíhají na elektrodách průchodem proudu, je možno v praxi využít různým způsobem. Při elektrolýze se na katodě vylučuje vodík nebo kov [11].

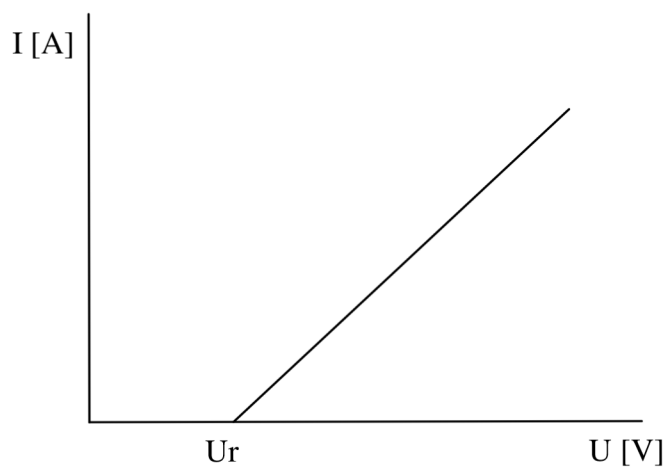
Uspořádaný pohyb iontů v elektrolytu končí na elektrodách, kde ionty odevzdávají náboje. Podle druhu iontů a materiálu elektrod může po odevzdání náboje nastat některá z těchto možností [11]:

- ionty se usazují na povrchu elektrod jako atomy nebo molekuly, vytvářejí na nich povlak
- ionty se vylučují jako atomy nebo molekuly plynu a unikají ve formě bublin z elektrolytu ven
- ionty chemicky reagují s materiálem elektrody
- ionty reagují s elektrolytem a vrací se do něj zpět

Podle dohody je směr proudu určen směrem pohybu kladných iontů. Trvalý proud v elektrolytu vzniká, jestliže připojené napětí překročí hodnotu tzv. rozkladného napětí U_r (na elektrodách mohou probíhat elektrochemické reakce). Při dalším zvětšování napětí pak proud I roste lineárně [11]:

$$U = U_r + R \cdot I, \quad (1)$$

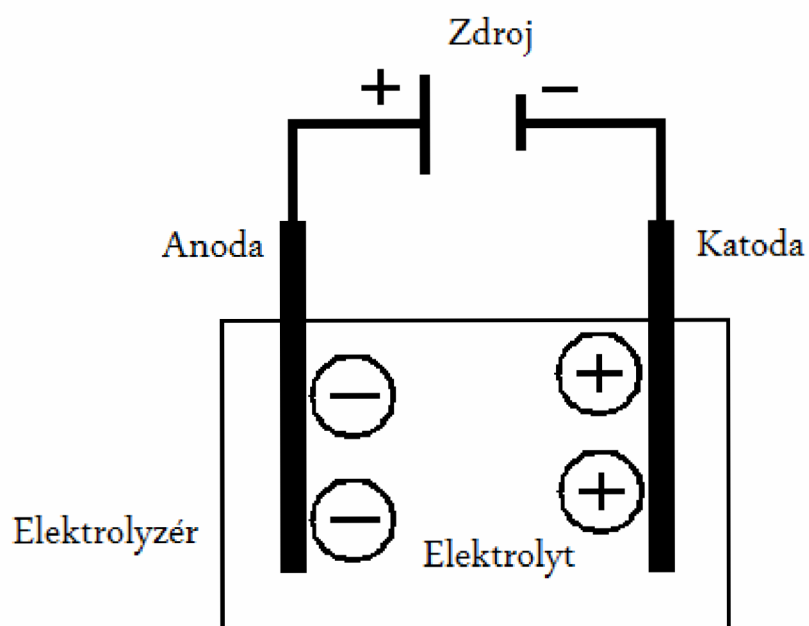
kde R se nazývá odpor elektrolytu



Obr. 2: Rozkladné napětí [11]

Využití elektrolýzy [3]:

- Výroba chlóru
- Rozklad různých chemických látek
- Elektrometalurgie
- Elektrolytické čištění kovů - rafinace
- Galvanické pokovování – pokrývání předmětů vrstvou kovu
- Galvanické leptání
- Galvanoplastika



Obr. 3: Princip zapojení elektrolyzéro

3.1 Příklady elektrolýzy

- **Elektrolýza vody**

Jednodušší a účinnější metodou než parní reforming a parciální oxidace ropných frakcí je elektrolýza vody. Je to proces, kdy je voda pomocí dodané elektrické energie štěpena na vodík a kyslík podle následující reakce [12].



Požadovaná elektrická energie je závislá na reakční entalpii, reakční entropii a na teplotě. Literatura [12] uvádí 1,23 V jako ideální napětí potřebné pro (vratné) štěpení. Teplo je také nezbytné pro účinnost elektrolyzátoru. Je-li energie dodávaná v elektrické formě, je nutné zvýšit teoretický potenciál o 0,252 V. Probíhá-li na elektrodách reakční mechanismus nevratně, rozkladné napětí musí být vždy větší. Přebytek napětí by měl být minimalizován, aby byl elektrolyzátor co nejučinnější. Typické napětí článku je od 1,85 do 2,05 V [12].

Princip elektrolýzy je následující: dvě molekuly vody jsou redukovány na katodě na jednu molekulu vodíku a dva hydroxylové ionty. Následně ionty migrují podle toku elektrického pole k propustné membráně na anodu, kde jsou vypuštěny jako $\frac{1}{2}$ molekuly kyslíku a jedna molekula vody. Kyslík a vodík odcházejí z elektrod jako plyny [12].

Účinnost procesu je obvykle vysoká (kolem 85 %) a je možné ji zvýšit přidáním elektrolytu (např. soli), který zvýší vodivost vody. Ve srovnání s ostatními metodami výroby vodíku je elektrolýza nákladnější technologií, její cena je závislá na dostupnosti levného zdroje energie [12].

Průmyslová výroba upřednostňuje alkalické roztoky, nejčastěji 25 % roztok KOH, protože umožňují snadnější kontrolu koroze a jsou levnější [12].

Elektrolýza vody s použitím pevného elektrolytu je považována za velmi nadějnou metodu, protože může pracovat s vysokou proudovou hustotou díky velkému snížení objemu v porovnání s KOH elektrolytem. Proces je založený na využití protonově vodivé membrány ze sulfonových kyselin (např. Nafion) s tloušťkou desetin milimetru, která působí jako kyselina a zároveň jako dělicí stěna. V těchto elektrolyzérch se používá pouze čistá voda. Systém má několik výhod, elektrolytický článek je pevnější, konstrukce a činnost elektrolyzátoru je jednoduchá a nejsou zde žádné problémy s korozí [12].

- **Elektrolýza roztoku kuchyňské soli**

Elektrolytem může být vodný roztok chloridu sodného NaCl (kuchyňská sůl), jenž je disociován na kladné ionty sodíku Na^+ a záporné ionty chloru Cl^- . Elektrody mohou být např. uhlíkové. Elektrické napětí mezi elektrodami usměrní pohyb Na^+ k záporné elektrodě, ze které si iont H^+ vezme elektron a změní se na elektricky neutrální částici - atom vodíku H, který se sloučí s jiným atomem vodíku za vzniku molekuly H_2 . Záporné ionty Cl^- jsou přitahovány ke kladné elektrodě, které odevzdají svůj přebytečný elektron a po dvou se sloučí do elektricky neutrální molekuly chloru Cl_2 . Na záporné elektrodě se z roztoku nevyučuje pevný sodík (to by se stalo, kdybychom místo vodného roztoku soli použili její taveninu - tímto procesem také lze s úspěchem kovový sodík vyrobit), ale probíhá zde redukce vodíku. Sodíkové kationty zůstávají v roztoku spolu s hydroxidovými anionty - jedná se o výrobu hydroxidu sodného [3].

- **Vysokoteplotní elektrolýza**

Pro vysokoteplotní elektrolýzu, nazývanou též někdy parní elektrolýza, je charakteristické, že část dodávané energie tvoří elektrická energie a část je přivedena ve formě tepla. Reakce probíhající ve vysokoteplotním elektrolyzátoru je reverzní k reakci probíhající v palivových článcích s pevnými oxidy. Do elektrolyzátoru vstupuje pára a vodík. Vystupuje z něho obohacená směs obsahující 75 % hmotnostních vodíku a 25 % hmotnostních páry. Z ní je na anodě oddělen iont kyslíku, který prochází skrze membránu. Vodík je pak z páry oddělen v kondenzační jednotce [6].

Výhodou je zvýšení účinnosti procesu díky snížené spotřebě elektrické energie a snadnějšímu překonání aktivační bariéry na povrchu elektrody. Při růstu teploty vstupní páry klesá spotřeba elektrické energie. Celková energie mírně roste, což je způsobeno právě nutným ohřevem páry. Další výhodou spočívá v cirkulaci samotných H_2O , H_2 a O_2 bez jiných chemických látek, což odstraňuje problémy s korozí. Celková účinnost vysokoteplotní elektrolýzy může dosahovat až 45 % [6].

3.2 Faradayovy zákony elektrolýzy

1 Faradayův zákon

Hmotnost látky vyloučené na elektrodě závisí přímo úměrně na elektrickém proudu procházejícím elektrolytem a na čase, po který elektrický proud procházel [3].

$$m = A \cdot I \cdot t, \quad (3)$$

kde m je hmotnost vyloučené látky, A je elektrochemický ekvivalent látky, I je elektrický proud, t je čas nebo také

$$m = A \cdot Q, \quad (4)$$

kde Q je elektrický náboj prošlý elektrolytem.

2 Faradayův zákon

Látková množství vyloučená stejným nábojem jsou pro všechny látky chemicky ekvivalentní, neboli elektrochemický ekvivalent A závisí přímo úměrně na molární hmotnosti látky M_m [3].

$$A = \frac{M_m}{F \cdot z}, \quad (5)$$

kde F je Faradayova konstanta $F = 96481 \text{ C/mol}$ a z , je počet elektronů, které jsou potřeba při vyloučení jedné molekuly.

3.3 Vlastnosti elektrolýzy

Při elektrolýze dochází k rozkladu vody na vodík a kyslík, aby se dosáhlo, co největší vodivosti přidává se do vody elektrolyt. K oddělení plynů se používá membrána.

Podle Faradayova zákona platí pro množství vzniklého vodíku a kyslíku následující rovnice [5]:

$$m_{H_2} = \frac{I \cdot t \cdot M_{H_2}}{2 \cdot F} \quad m_{O_2} = \frac{I \cdot t \cdot M_{O_2}}{4 \cdot F}, \quad (6), (7)$$

kde I je proud procházející elektrolyzérem, t je doba trvání elektrolýzy, F je Faradayova konstanta, M_{H_2} je molární hmotnost vodíku a M_{O_2} je molární hmotnost kyslíku.

Z těchto rovnic plyne, že při elektrolýze vzniká dvojnásobné množství vodíku než kyslíku.

Na elektrolýzu vody je třeba dodat na vyloučení jednoho molu H₂ energii 237 376 J ve formě elektrické energie [15].

Z hodnoty změny standardní Gibbsovi energie bylo vypočítané rovnovážné napětí při standardních podmínkách (298 K, 101 325 Pa) [15].

$$U_{rov} = \frac{\Delta G_{298}^0}{n.F} = \frac{237376}{192969,12} = 1,23 \text{ V}, \quad (8)$$

kde n je počet výměnných nábojů a F je Faradayova konstanta.

Při tomto napětí je výtěžek elektrolýzy nulový a proto jak mají v elektrolyzáru probíhat elektrochemické reakce s určitou požadovanou rychlostí a účinností musí přes elektrolyzáru protékat přiměřeně velký proud a tedy musíme zvýšit napětí článku [15].

Další hodnotou napětí pro průběh elektrolýzy vody v elektrolyzárech je hodnota termoneutralního (izotermního) napětí, při kterém elektrolyzáru pracuje autotermně, tedy celková energie dodávaná ve formě elektrického proudu se při uvedeném napětí využije na udržení izotermického průběhu elektrolýzy při standardních podmínkách [15].

$$U_m = \frac{\Delta H_{298}^0}{n.F} = \frac{286030}{192969,12} = 1,48 \text{ V}, \quad (9)$$

kde ΔH_{298}^0 je standardní molová entalpie.

Pokud elektrolyzáru pracuje při teplotě 298 K při napětí v intervalu 1,23 až 1,48 V, odebírá z okolí teplo a naopak při vyšším napětí jak 1,48 V teplo do okolí odevzdává a elektrolyzáru je potřeba chladit [15].

3.4 Spotřeba elektrolyzáru

Teoretická spotřeba energie elektrolyzáru je minimální potřebná energie, která je za standardních podmínek (teplotě 25 °C a 100 % proudových výtěžcích), potřebná k elektrolytickému rozkladu vody. Pro výrobu 1 m³ vodíku a 0,5 m³ kyslíku je tato energie dána součinem rovnovážného napětí U_{rov} a množství elektrického proudu Q_t v ampérhodinách [5].

Při elektrolýze prováděné za normálního tlaku, činí proudové výtěžky přes 99 %. Nepatrné ztráty jsou způsobeny rozpustností plynů v elektrolytu a jejich difúzí přes membránu k opačně nabitým elektrodám, na kterých podléhají zpětným reakcím [5].

Jeden Coulomb (definovaný jako elektrický náboj přenesený proudem 1 ampéru za 1 sekundu, tj. 1 Coulomb = 1 ampérsekunda) obsahuje $1/1,602 \cdot 10^{-19}$ elektronů, což představuje počet $6,2422 \cdot 10^{18}$ elektronů. Z jednoho Coulombu tedy vyrobíme $3,1211 \cdot 10^{18}$

molekul vodíku. Dle Avogadrovy konstanty obsahuje jeden mol vodíku $6,022 \cdot 10^{23}$ molekul. Z toho vyplývá, že pro výrobu jednoho molu vodíku potřebujeme [5]

$$\frac{6,022 \cdot 10^{23}}{3,1211 \cdot 10^{18}} = 192944,8 \text{ C} = 192944,8 \text{ As} = 53,6 \text{ Ah} \quad (10)$$

Jeden mol vodíku má objem $22,4 \text{ dm}^3$. Spotřeba elektrického náboje pro výrobu 1 m^3 vodíku a $0,5 \text{ m}^3$ kyslíku je tedy [5]:

$$Q_t = \frac{1000}{22,4} \cdot 53,6 = 2392,86 \text{ Ah} \quad (11)$$

Celková spotřebovaná energie je tedy [5]:

$$W_t = U_{rov} \cdot Q_t = 1,23 \cdot 2392,86 = 2943,22 \text{ Wh} \quad (12)$$

Ve světě byl publikován článek [13], jak vyrábět vodík a to při velmi nízkém provozním napětí ve srovnání s elektrolýzou vody. Při elektrolýze se využívá vodný roztok metanolu. Teoretické napětí potřebné pro uvedenou elektrolýzu metanolového roztoku je pouze $0,02 \text{ V}$, což je mnohem nižší v porovnání s $1,23 \text{ V}$ potřebného pro elektrolýzu vody.

Nejlepších výsledků bylo dosaženo při 4 M roztoku metanolu. Použitá membrána je od společnosti DuPont s označením Nafion-117, před použitím byla vařena ve 3% roztoku peroxidu vodíku, aby se odstranili organické nečistoty. Následně byla membrána omyta vodou a vařena v 1 M kyselině sírové, aby se odstranili kovové nečistoty, nakonec byla ještě vařena v destilované vodě. Použitá elektroda pro anodu Pt-Ru / C a pro katodu Pt / C, obě o aktivních plochách 25 cm^2 . Při $80 \text{ }^\circ\text{C}$ bylo možné metanolový elektrolyzátor provozovat při proudové hustotě $0,5 \text{ A/cm}^2$, vodík tím vznikal při napětí $0,62 \text{ V}$, což odpovídá spotřebě energie $1,48 \text{ kWh / Nm}^3$ [13].

4 Plynová chromatografie

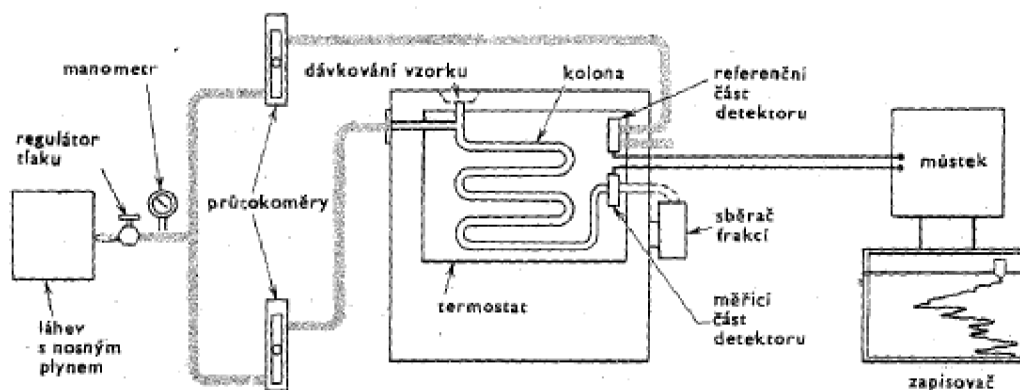
Chromatografie má význam především jako analytická metoda, ale její aplikace i v preparativní chemii jsou důležité. Slouží k dělení směsí a k izolaci a částečnému popisu oddělovaných látek, z nichž některé se mohou objevit nečekaně nebo jejichž přítomnost ve směsi nemusí být předem známa [14].

V chromatografii se oddělené složky rozdělují mezi dvě fáze. Jedna z fází je nepohyblivá a má velký povrch nebo objem, druhá je fluidní a prochází nepohyblivou vrstvou nebo podél ní. K přechodu hmoty mezi pohyblivou a nepohyblivou fází dochází proto, že molekuly ze směsi se absorbují na povrchu částic nebo v pórech popř. přecházejí do vrstvy kapaliny ulpívající na povrchu nebo uvnitř pórů. Tento pochod se často nazývá sorpce [14].

Při dělení plynovou chromatografií se postupuje takto: Vzorek obsahující dělené látky se vstříkne do vyhřátého bloku, kde se okamžitě vypaří a je unášen proudem nosného plynu jako „obláček“ páry na vstup do kolony. Dělené látky se absorbují na začátku kolony na nepohyblivou fází a pak desorbují čerstvým nosným plynem. Nosný plyn unáší vzorek k výstupu a dělicí proces se stále opakuje. Každá látka postupuje kolonou svou vlastní rychlostí. Páry látek se rozdělí podle jejich rozdělovacích konstant a podle stupně rozmývání zón. Látky se postupně eluují v pořadí podle zvětšujících se rozdělovacích konstant a vstupují do detektoru připojeného k výstupu kolony. Tam se registrují jako série signálů odpovídajících změnám koncentrace a rychlostem eluce. Použije-li se zapisovače, objeví se signály na zápisu jako časová závislost složení proudu nosného plynu [14].

Tvar, čas, výšku a plochu těchto píků na chromatogramu lze měřit a získat tak kvalitativní i kvantitativní analytické údaje. Hlavní výhodou plynové chromatografie proti ostatním kolonovým chromatografickým metodám je možnost použít delších kolon a dosáhnout dokonalejšího rozdělení [14].

Každý chromatograf má v podstatě šest částí: 1. zdroj nosného plynu v tlakové láhvi s připojenými regulátory tlaku a průtokoměry, 2. zařízení k dávkování vzorků, 3. dělicí kolonu, 4. detektor, 5. elektrometrický zapisovač a 6. dělené termostaty pro kolonu a detektor k udržování jejich teploty [14].



Obr. 4: Schéma plynového chromatografu [14]

Nosným plynem může být helium, dusík, vodík nebo argon. Výběr plynu se řídí podle jeho dostupnosti, čistoty, spotřeby a podle typu použitého detektoru [14].

Nejdůležitější součástí, která ovlivňuje přesnost plynové chromatografie je zařízení k dávkování vzorku. Kapalně vzorky se vstříkují mikrostřičkou pomocí jehly a samotěsnící zátky ze silikonové pryže do vyhřátého bloku. Pro nejúčinnější dělení by se mělo se zřetelem k citlivosti detektoru používat co nejmenší množství vzorku. Reprodukovatelnost je asi 2 % [14].

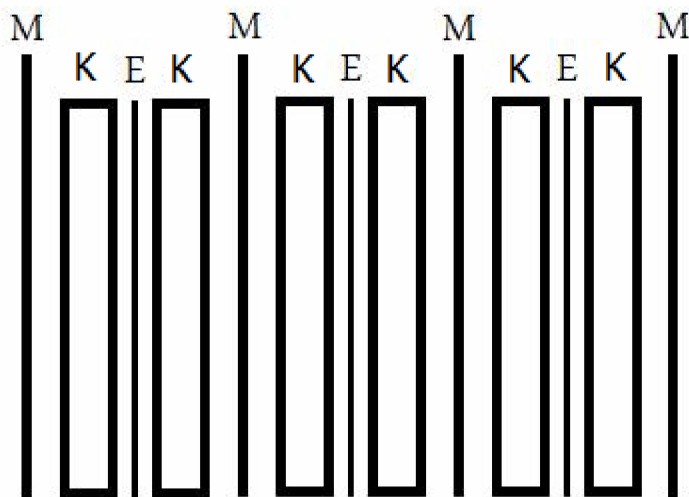
Plynné vzorky se vstříkují plynotěsnou stříkačkou nebo kalibrovanou obtokovou pipetou [14].

V chromatografické koloně dochází k dělení, proto je nejdůležitější částí chromatografu. Kolony jsou zhotoveny z trubic buď zahnutých do tvaru U nebo stočených do otevřené šroubovice či ploché spirály. Měď se doporučuje pro teploty do 250 °C a nerezová ocel pro teploty vyšší. Jestliže se látky při styku s kovem rozkládají, musí se použít skleněné kolony [14].

Čím více jsou eluční píky užší, tím je kolona účinnější. Úzké píky jsou nejvhodnější k rozlišení směsi. Šířka píky je výsledkem interakce mnoha proměnných včetně těch, jež ovlivňují retenční objem. Retenční objem je součin retenčního času (vzdálenost na časové ose chromatogramu od bodu nástřiku vzorku k maximu píky eluované složky) a rychlosti toku plynu. Získá-li se chromatogram za lineárních elučích podmínek, vytvoří každá dělená látka v ideálním případě zvonovitou nebo Gaussovu křivku [14].

5 Konstrukce elektrolyzáru

Průchodem elektrické energie elektrolyzárem, dochází ke vzniku požadovaných látek. Elektrolyzáru se skládá z elektrod, elektrolytu, membrán a konstrukčních desek.



Obr. 5: Schéma zapojení elektrolyzáru

Kde M značí membránu, K je konstrukční deska a E je elektroda.

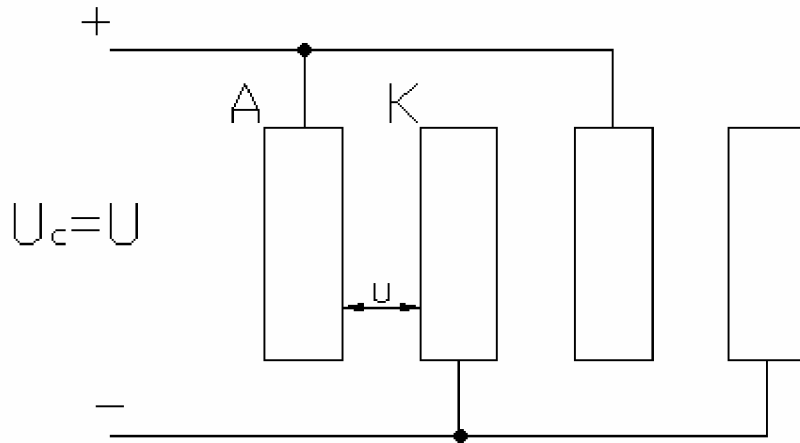
5.1 Elektrody

V elektrolyzáru budou použity elektrody, které jsou vyrobeny z niklu, který má výhodu ve svých vlastnostech a stálosti v zásaditém prostředí. Mohou být však použity i jiné elektrody například z nerezí.

5.1.1 Zapojení elektrod

Jsou dva možné způsoby zapojení elektrod v elektrolyzáru a to monopolární a bipolární.

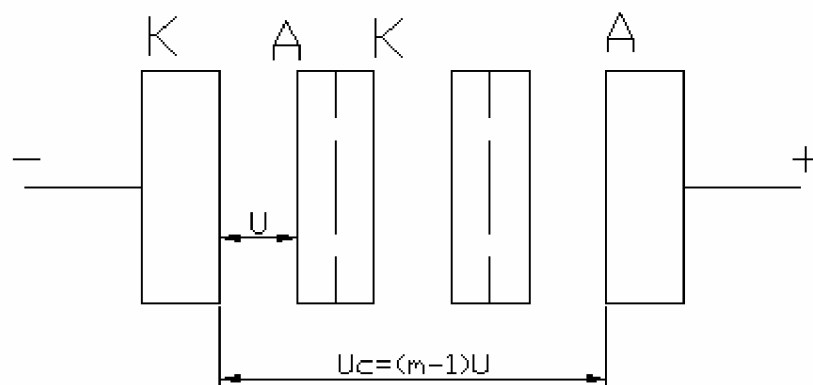
Pokud jsou elektrody zapojeny monopolárně má každá elektroda jinou polaritu a je tedy anodou nebo katodou. Takto zapojené elektrody jsou spojeny paralelně.



Obr. 6: Monopolární zapojení elektrod

Na obr. 6 je jedna z možností zapojení monopolárních elektrod.

Pokud jsou elektrody zapojeny bipolárně, chová se jedna strana elektrody jako anoda a druhá jako katoda.



Obr. 7: Bipolární zapojení elektrod

Jak vyplývá z obr. 7 u bipolárního zapojení, jsou napájeny jen krajní dvě elektrody, ostatní nejsou zapojeny.

Napětí při bipolárním zapojení se určí:

$$U_c = (m-1)U, \quad (13)$$

kde m značí počet elektrod, U je napětí mezi sousedními elektrodami.

Monopolární zapojení pracuje s vyššími proudy než zapojení bipolární, zatímco u napětí je tomu naopak. U monopolárního zapojení je každá elektroda připojena ke zdroji napájení.

5.2 Elektrolyt

Jako elektrolyt může být použita voda, která má ale nevýhodu v tom, že má velký odpor. Aby se tento odpor minimalizoval, budeme používat hydroxid draselný (KOH) a to s různou koncentrací. Mohou být však použity i jiné hydroxidy např. hydroxid sodný (NaOH).

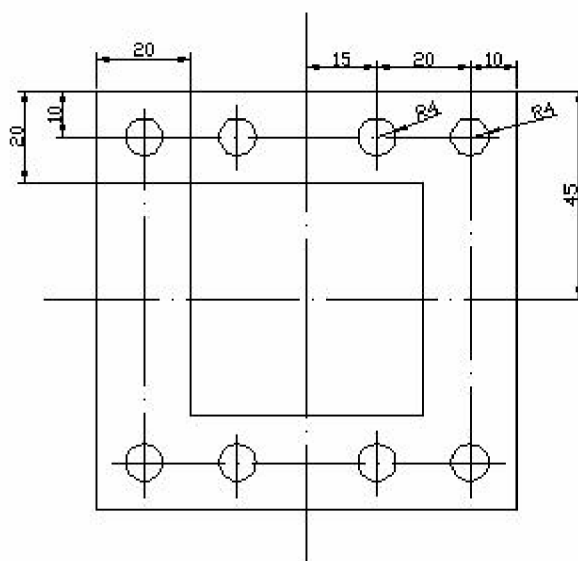
Elektrolyt může být kyselý, ale i zásaditý. Z tohoto důvodu musíme používat membrány i elektrody, které jsou vhodné pro daný elektrolyt.

5.3 Konstrukční desky

Konstrukční desky jsou vyrobeny z průhledného plexiskla a slouží jako základní prvek elektrolyzéro. Rozměry desky jsou uvedeny níže.

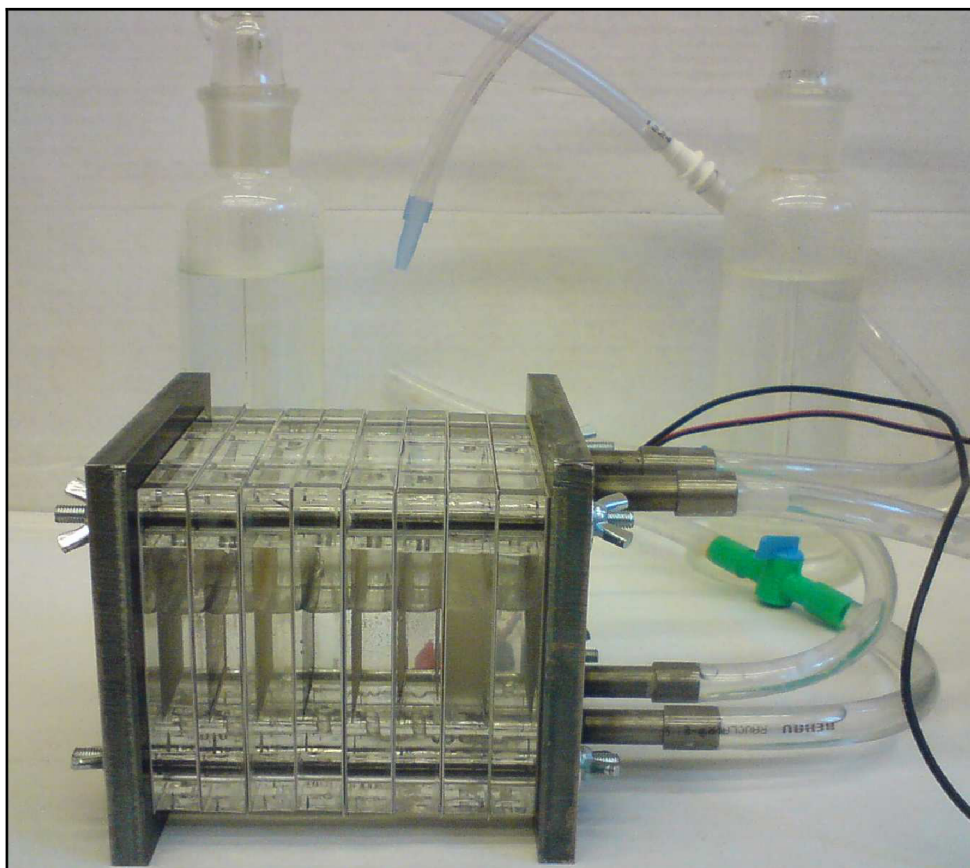
5.3.2 Konstrukční deska elektrolyzéro

Elektrolyzér je vyroben až pro 4 elektrody, pro jednoduchost byli zapojeny jen dvě elektrody, takže na každé elektrodě vzniká jiný plyn. Rozměry konstrukční desky u elektrolyzéro jsou 90×90 mm, tloušťka je 10 mm.



Obr. 8: Konstrukční deska elektrolyzéro

Krajní čtyři otvory slouží k sešroubování celé konstrukce elektrolyzéro. Horní dva otvory uprostřed slouží k odvádění plynů, které vznikají při elektrolýze. Dolními dvěma otvory uprostřed se plní elektrolyzér elektrolytem.



Obr. 9: Elektrolyzér

5.4 Membrány

Membrány slouží k oddělení plynů, aby nedocházelo k jejich mísení a nevznikala tak výbušná směs. Rozdělujeme membrány podle toho, jaké oddělují látky vznikající na anodě a na katodě.

Budeme se zabývat komerčně vyráběnými heterogenními membránami RELAX[®], a dále membránami vyrobenými z netkané textilie od Brněnské továrny plstí a od firmy DuPont. Základní požadavky na membrány jsou dobré mechanické a elektrochemické vlastnosti. Hlavní výhodou netkaných textilií je jejich nízká cena.

5.4.1 Heterogenní iontoměničové membrány RELAX[®]

Heterogenní membrána je vysoce plněný polymerní kompozit složený z velmi jemně mletých polymerních částic s iontovýměnnými funkčními skupinami, zakotvenými v inertní polymerní matici a armující textilii, která zlepšuje mechanické vlastnosti membrány [4].

Membrány jsou děleny podle typu iontů, které propouštějí, na katexové membrány (propouští kationy) a anexové membrány (propouští aniony) [4].

Charakteristickým znakem iontoměničových membrán jsou funkční skupiny kovalentně vázané na polymerní skelet. Náboj vázaných iontů v membráně je vyvážen ekvivalentním nábojem tzv. protiiontem. Je-li polymer umístěn do vodného roztoku, zbobtná a stává se plastickým. Ve zbotnalém polymeru se mohou protiionty volně pohybovat difúzním mechanismem nebo působením elektrického pole. Za předpokladu, že bude zachována elektroneutralita, mohou protiionty vystupovat z membrány a vstupovat do ní z vnějšího roztoku. V elektrickém poli se membrána chová jako iontový vodič a propouští ionty jednoho typu náboje s vysokou selektivitou. Katexové membrány typu RALEX[®]CM nebo CHM propouští kationy a anexové membrány typu RALEX[®]AM nebo AHM propouští anionty, přičemž oba typy membrán zabraňují hydrodynamickému toku rozpouštědla [4].

Selektivity a blokování toku rozpouštědla se pak využívá v jednotlivých procesech. Jde hlavně o separační, demineralizační a koncentrační procesy při elektrodialýze (ED), elektroforéze (EF), elektrodeionizaci (EDI), membránové elektrolýze (ME) apod [4].

Membrány se vyznačují vynikajícími mechanickými a elektrochemickými vlastnostmi zejména nízkým elektrickým odporem, vysokou permselektivitou, vysokou odolností proti agresivním chemikáliím a průmyslovým membránovým jedům, dobrou tepelnou odolností, vysokou životností (podle prostředí až 10 let), schopností pracovat v širokém rozsahu pH atd. Do pracovního stavu se uvádí zbobtnáním ve vodě, popřípadě kondicionováním a úpravou membrány podle použitého aparátu. Membránám RALEX[®] nevadí opětovné vysoušení a bobtnání a ve zbotnalém stavu jsou dobře ohebné a formovatelné. V suchém stavu jsou však křehké a nesmí se příliš deformovat [4].

Tab. 2: Vlastnosti membrán RELAX[®] [4]

Typ	CM-PAD	AM-PAD	AMH5E-HD
použití	elektrodialýza elektrodeionizace	elektrodialýza elektrodeionizace	kataforéza
iontovýměnná sk.	R-SO ₃ ⁻	R-(CH ₃) ₃ N ⁺	R-(CH ₃) ₃ N ⁺
pojivo	polyethylen	polyethylen	polyethylen
armující textilie	Polyamid (PAD)	Polyamid (PAD)	Polyester (PES-HD)
tloušťka [mm]			
suchá	< 0,45	< 0,45	< 0,8
zobtnalá	< 0,65	< 0,7	< 1,25
elektrický odpor			
plošný RA [$\Omega \cdot \text{cm}^2$]	< 8,5	< 7	< 19
specifický RS [$\Omega \cdot \text{cm}$]	< 160	< 120	< 170
převodové číslo protiiontu (1.0/05 N NaCl)	> 0,95	> 0,95	> 0,94
hydrodynamická permeabilita			
[ml/h.m ²] ($\Delta p=1 \text{ bar}$)	0	0	0
změny při bobtnání [%]			
tloušťka	< 45	< 50	< 55
délka	< 9,0	< 9,5	< 1,5
šířka	< 9,5	< 10	< 3,5
hmotnost	< 60	< 70	< 55
výměnná kapacita			
[mval/g]	2,2	1,8	1,8

Technologický postup při bobtnání membrán RELAX[®]

Cílem bobtnání heterogenních ionexových membrán RELAX[®] je jejich přivedení do „pracovního stavu“. Během bobtnacího procesu dochází ke změnám fyzikálně-mechanických a elektro-chemických vlastností membrány, čímž se membrána stává iontově vodivou. Rovněž v průběhu bobtnání dochází k rozměrovým a objemovým změnám původně suchého membránového průřezu. Ukončení bobtnání je při dosažení rovnovážného stavu, kdy se vlastnosti membrány již dále nemění [4].

Membrány RELAX[®] mohou podle typu běžně pracovat v širokém rozmezí pH, při teplotách od 10 °C do 50 °C, v prostředí bez oxidačních činidel a membránových jedů [4].

Standardní bobtnání

Standardní bobtnání membrán RELAX[®] se provádí v demineralizované vodě (popř. minimálně v pitné vodě) při teplotě 25 – 45 °C po dobu minimálně 48 hodin. Suchá membrána se vloží do vody uváděné kvality, popř. do bobtnacího roztoku a nechá se požadovanou dobu bobtnat. Během bobtnacího cyklu je třeba důsledně kontrolovat řádné

ponoření membrán a případně průběžně vytěšňovat vzduchové bubliny, ulpívající na povrchu membrán [4].

Speciální bobtnání se změnou původní iontové formy membrány

Speciální bobtnání se provádí v příslušném bobtnacím roztoku s následným kondicionováním a ekvilibrací membrán. Tento postup se liší v závislosti na konkrétním použití membrán [4].

Manipulace

Jakákoliv manipulace s membránou RELAX[®] se doporučuje ve zbobtnalém stavu, ve kterém jsou tyto membrány plastické a méně náchylné k deformaci. Rovněž je nutno maximálně omezit jejich pobyt mimo bobtnací roztok, aby nedocházelo k jejich vysychání, které je spojeno především s rozměrovými změnami, což při následném formátování membrán může způsobit značné chyby. Membránám RELAX[®] vyjimečně nevádí opětovné vysušení a následné zbobtnání, výrobce ovšem tento postup nedoporučuje. Membrány RELAX[®] jsou ve zbobtnalém stavu dobře ohebné a formovatelné naopak v suchém stavu jsou křehké a nesmí se jakkoliv deformovat [4].

Pro elektrolýzu budeme používat následující membrány RELAX[®] [4]:

CM-PAD, což je heterogenní katexová membrána pro elektrodialýzu a membránovou elektrolýzu,

AM-PAD, což je heterogenní anexová membrána pro elektrodialýzu a membránovou elektrolýzu a

AMH5E-HD, což je heterogenní anexová membrána pro kataforézu.

Všechny tři zmiňované membrány jsou použitelné do zásaditého prostředí.

5.4.2 Membrány od Brněnské továrny plstí

V elektrolyzáru budou použity dva druhy membrán od této firmy, a to netkané a filtrační textilie.

Netkané textilie vyrobené z polyesterových, polypropylenových a viskózových vláken se používají jako filtrační textilie pro filtraci vzduchu (ve formě kapes, hadic, pytlů, plachetek) a pro filtraci kapalin. Dále se používají k různým izolacím v automobilovém průmyslu, k izolování vodovodních instalací, k izolačním účelům pro ekologické skládky, pro zpeňovací účely, jako separační vrstva při výstavbě násypných těles komunikací, k různým technickým a dekoračním účelům [7].

Tab. 3: Membrána PDC 95 [7]

Tloušťka [mm]	Hmotnost		Hustota [g/cm ³]	Výrobní kus			Materiálové složení	Vlhkost	Barva
	[g/bm]	[g/cm ²]		Šířka [cm]	Délka [m]	Hmotnost [kg]			
1	142,5	95	-	150	50	7	100 % polyester	-	uni

Tab. 4: Membrána VPK PES/SOL [7]

Tloušťka [mm]	Hmotnost		Hustota [g/cm ³]	Výrobní kus			Materiálové složení	Vlhkost	Barva
	[g/bm]	[g/cm ²]		Šířka [cm]	Délka [m]	Hmotnost [kg]			
1,3	450	300	-	190	50	23	100 % PES	-	bílá

Druhým typem membrán jsou filtrační textilie

Tab. 5: Membrána FIT POP I [8]

Hmotnost [g/m ²]	Výrobní kus			Materiálové složení	Barva	Pevnost		Tažnost	
	Šířka [cm]	Délka [m]	Hmotnost [kg]			podélná	příčná	podélná	příčná
500	140	40	28	100 % POP	světle zelená	min. 550 N/5 cm	min. 1000 N/5 cm	max. 120 %	max. 70 %
Prodyšnost při 200 Pa min 150 l/m ² s						Tepelná odolnost max. 90 °C			

Tab. 6: Membrána FIT POP II [8]

Hmotnost [g/m ²]	Výrobní kus			Materiálové složení	Barva	Pevnost		Tažnost	
	Šířka [cm]	Délka [m]	Hmotnost [kg]			podélná	příčná	podélná	příčná
300	140	40	17	100 % POP	světle zelená	min. 350 N/5 cm	min. 500 N/5 cm	max. 60 %	max. 40 %
Prodyšnost při 200 Pa min 200 l/m ² s					Tepelná odolnost max. 90 °C				

Tab. 7: Membrána FIT PES II [8]

Hmotnost [g/m ²]	Výrobní kus			Materiálové složení	Barva	Pevnost		Tažnost	
	Šířka [cm]	Délka [m]	Hmotnost [kg]			podélná	příčná	podélná	příčná
500	140	40	28	100 % PES	bílá	min. 1000 N/5 cm	min. 900 N/5 cm	max. 50 %	max. 55 %
Prodyšnost při 200 Pa min 200 l/m ² s					Tepelná odolnost max. 150 °C				

Tab. 8: Membrána KAV V [8]

Hmotnost [g/m ²]	Výrobní kus			Materiálové složení	Barva	Pevnost		Tažnost	
	Šířka [cm]	Délka [m]	Hmotnost [kg]			podélná	příčná	podélná	příčná
500	140	40	28	100 % POP	zelená	min. 600 N/5 cm	min. 900 N/5 cm	max. 110 %	max. 80 %
Prodyšnost při 200 Pa min 100 l/m ² s					Tepelná odolnost max. 90 °C				

5.4.3 Membrány DuPont

Membrána od firmy DuPont se vyrábí pro různé průmyslové odvětví. Použitá membrána má označení Sontara® a je vyrobena z netkané textilie speciální technologií (neobsahuje žádná chemická pojiva, je mechanicky zapletená a promívaná vodou [9]).

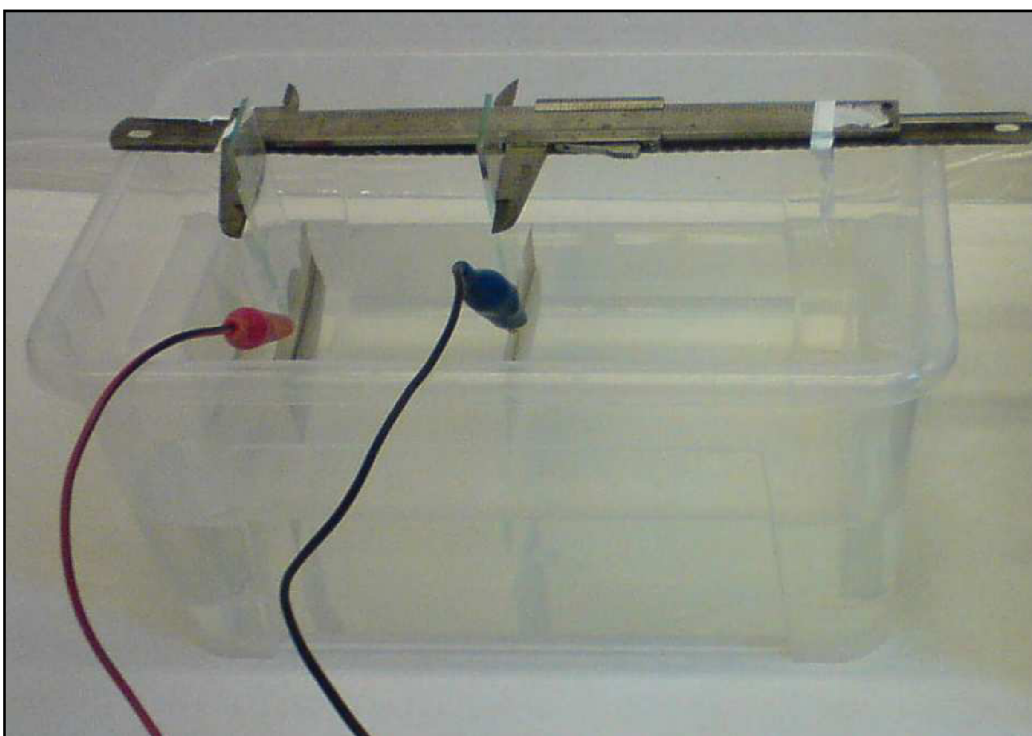
Výhodné vlastnosti jsou především [9]:

- Velmi pevná a to i za mokra
- Vysoce nasákavá (objem i rychlost)
- Nepouští vlákna
- Jemná
- Odolná proti rozpouštědlům

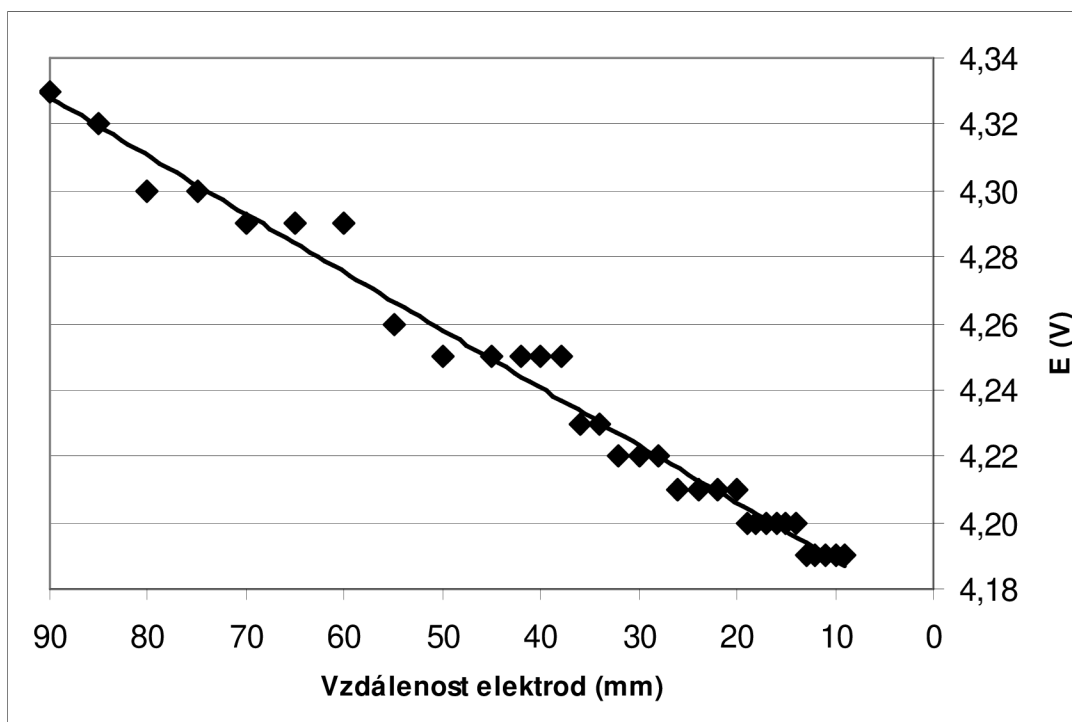
6 Měření vlastností elektrolýzy

6.1 Vliv vzdálenosti elektrod na potenciál

Měření probíhalo v otevřené nádobě z plastu, kvůli jednoduchosti manipulace posunu elektrody. Pro měření byly použity dvě niklové elektrody o rozměrech 60 x 70 x 0,2 mm. Elektrolyt byl použit hydroxid draselný (KOH) a to 5 molární o teplotě 18,5 °C. Elektrický proud byl udržován na 0,5 A. Vzdálenost byla měněna od 90 mm do 4 mm.



Obr. 10: Změna potenciálu v závislosti na posunu elektrody



Obr. 11: Závislost potenciálu na vzdálenosti elektrod

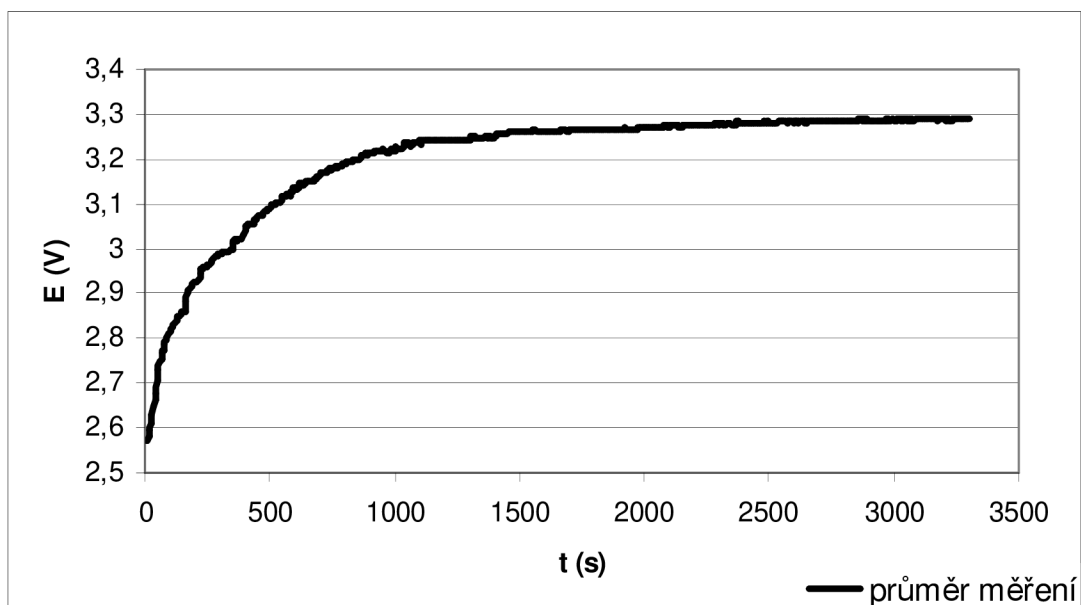
Z grafu je patrné, že zmenšováním vzdálenosti mezi elektrodami dochází lineárně k poklesu potenciálu. Při vzdálenosti 90 mm jsme naměřili potenciál 4,33 V, a při vzdálenosti 9 mm jsme naměřili potenciál 4,19 V.

6.2 Krátkodobá elektrolýza

Elektrody byly použity niklové o rozměrech 50 x 50 x 0,5 mm a byly zapojeny bipolárně. Elektrolyt byl použit 1 molární hydroxid draselný (KOH) o teplotě 23 °C. Elektrolyzér byl naplněn hydroxidem draselným z 80 % což 40 ml objemu, z důvodu odvodu plynů. Elektrický proud byl udržován na hodnotě 0,5 A. Všechna měření byla provedena na přístroji National Instruments NI PXI-1042Q.

Bez výměny elektrolytu

Měření bylo realizováno třikrát každé o délce 55 minut. Po každém měření byl elektrolyzér rozdělán a vyčištěn, elektrody byly ponořeny cca na 1 minutu do roztoku v objemu 360 ml vody a 40 ml kyseliny octové. Tímto způsobem byl odstraněn oxid, který se vytvářel na elektrodách během elektrolýzy. Po každém měření byl elektrolyt vyměněn. U tohoto měření nebyly použity membrány.

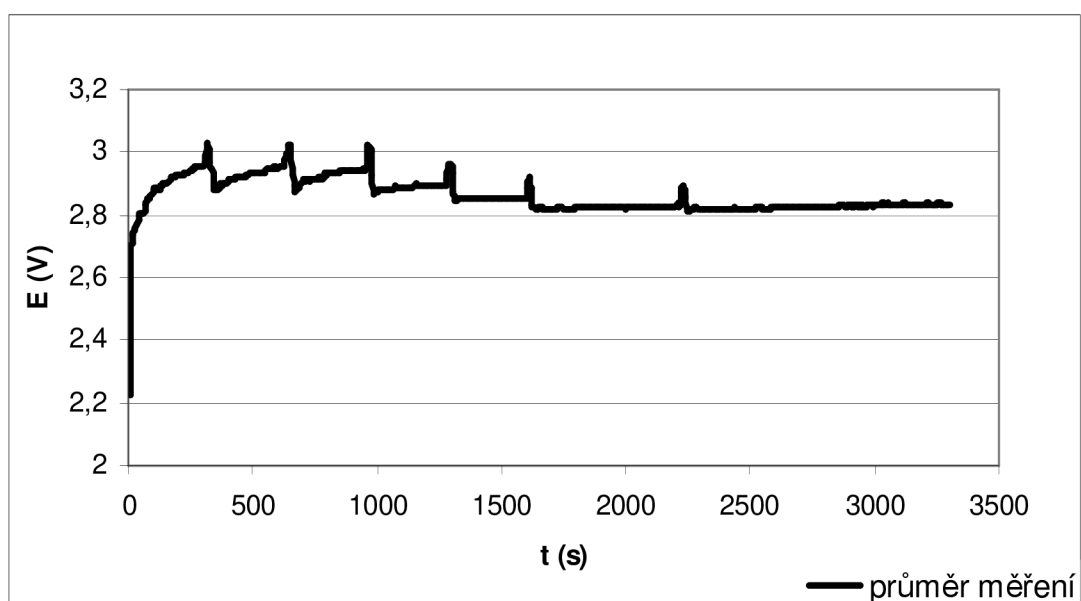


Obr. 12: Závislost potenciálu na době elektrolýzy bez výměny elektrolytu

Výsledný graf vznikl průměrem třech měření. Největší nárůst potenciálu je cca do 1000 sekund, kdy ještě elektrolyt není prosycen bublinkami. Od času 1000 sekund dochází již k nepatrnému nárůstu potenciálu. Je to pravděpodobně způsobené degradací elektrolytu.

S výměnou elektrolytu

Měření bylo realizováno dvakrát každé o délce 55 minut. Po každém měření byl elektrolýzér rozdělán a vyčištěn, elektrody byly ponořeny cca na 1 minutu do roztoku. V objemu 360 ml vody a 40 ml kyseliny octové. Pro tento případ měření nebyly použity membrány.

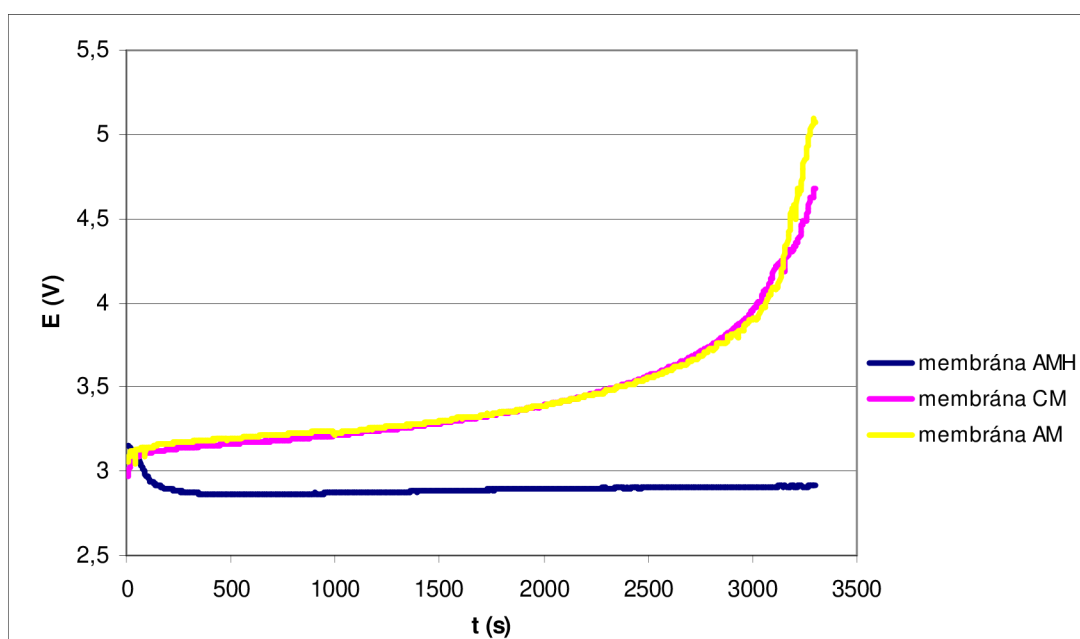


Obr. 13: Závislost potenciálu na době elektrolýzy s výměnou elektrolytu

Výsledný graf vznikl průměrem dvou měření. Špičky, které vznikly, jsou způsobeny tím, že došlo k odsání elektrolytu z prostoru elektrolyzátoru a tím k následnému zvýšení potenciálu. Poté byl napuštěn nový elektrolyt do elektrolyzátoru a došlo ke skokovému snížení potenciálu jak je zřejmé z obr. 13. Elektrolyt byl odsát 5 krát po pěti minutách a následně po deseti minutách. Jak vyplývá z grafu má výměna elektrolytu velký význam.

Měření s membránami

Měření bylo provedeno na třech typech membrán: CM-PAD, AM-PAD a AMH5E-HD. Pro každou membránu měření proběhlo dvakrát, každé o délce 55 minut. Po každém měření byl elektrolyzátor vyčištěn a elektrody ponořeny cca na jednu minutu do roztoku. V objemu 360 ml vody a 40 ml kyseliny octové. Membrána byla ponořena do destilované vody.



Obr. 14: Závislost potenciálu na době elektrolýzy s membránami

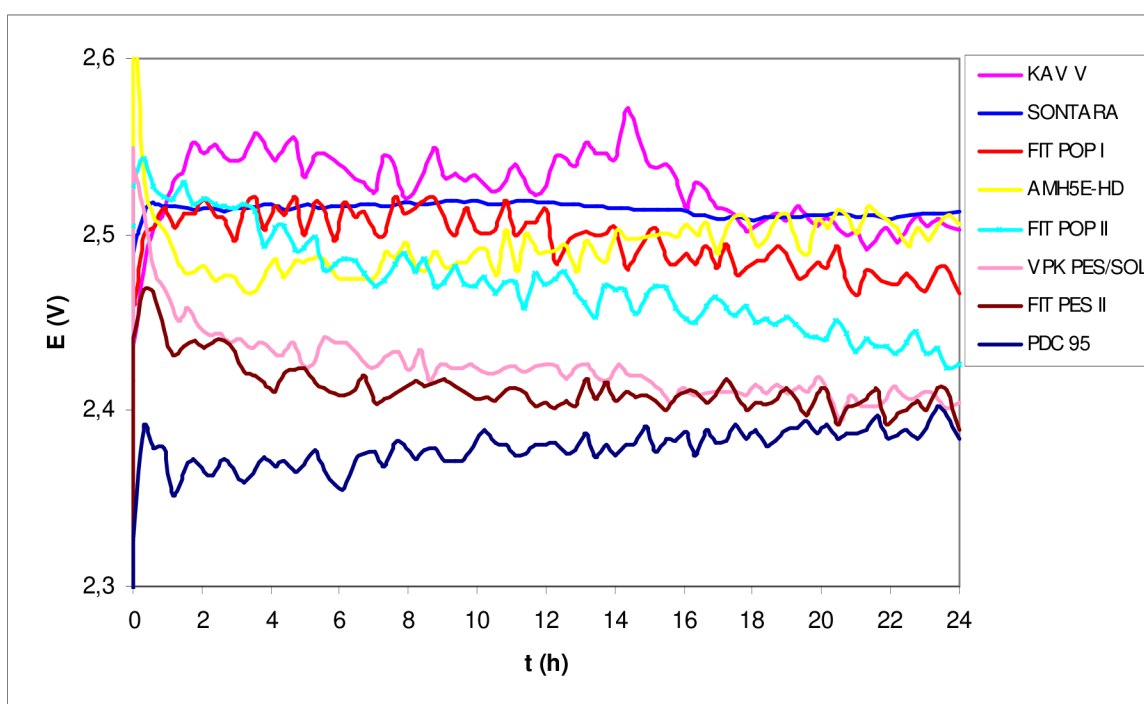
Z grafu je patrné, že při použití membrán AM a CM dochází při elektrolýze k výraznému růstu potenciálu. Tímto zjištěním jsou tyto dvě membrány pro účely elektrolýzy prakticky nevhodné. Jako nejvhodnější se ukázala membrána AMH5E u které potenciál cca do třetí minuty klesal. Poté se potenciál po celou dobu elektrolýzy už výrazně neměnil.

6.3 Dlouhodobá elektrolýza

Elektrolýza probíhala 24 hodin pro každou membránu. Cílem bylo zjistit vhodnost membrán pro dlouhodobou výrobu vodíku. Elektrody byly použity nerezové o rozměrech 50 x 50 x 0,5 mm a byly zapojeny bipolárně. V elektrolyzáru byl použit 1 M a poté 5 M roztok hydroxidu draselného (KOH) o teplotě 25 °C. Elektrolyzáru byl naplněn elektrolytem z 80 %, což je 40 ml objemu, z důvodu rezervy odvodu plynů. Elektrický proud byl udržován na hodnotě 0,4 A. Měření byla provedena na přístrojích VSP od firmy BioLogic a National Instruments NI PXI-1042Q .

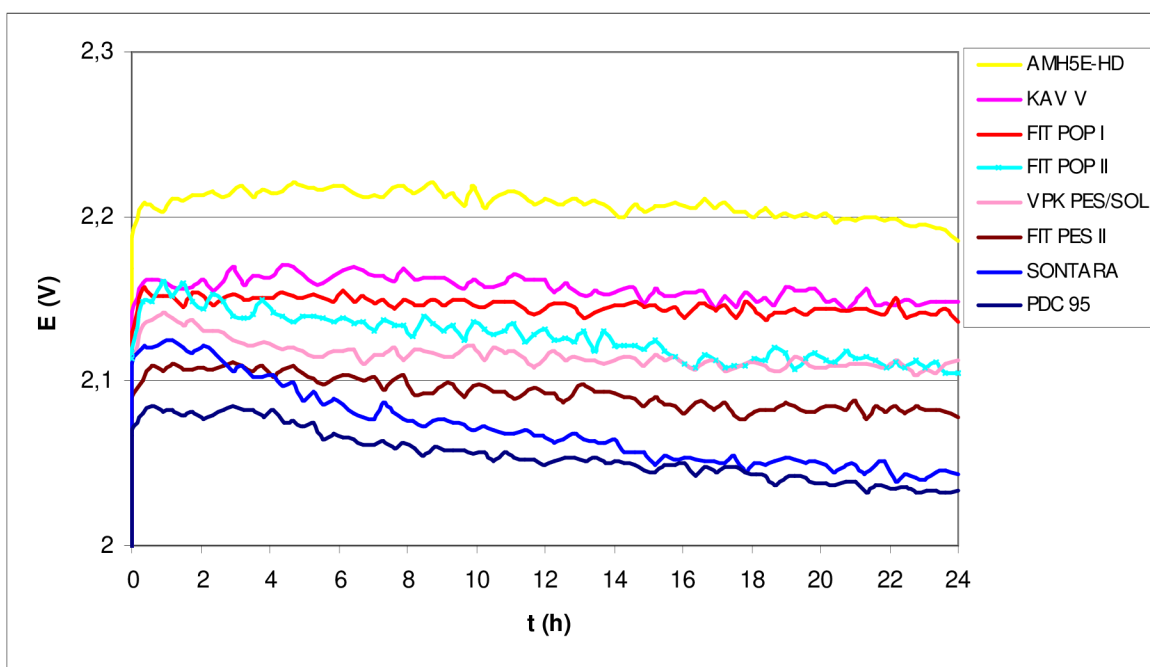
Po každém měření byl elektrolyzáru rozdělán a vyčištěn, elektrody byly ponořeny do kyseliny chlorovodíkové (HCL) 35 %. V objemu 200 ml vody a 5 ml HCL.

V následujících grafech je ukázána závislost potenciálu na čase při použití 1 M a 5 M roztoku hydroxidu draselného.



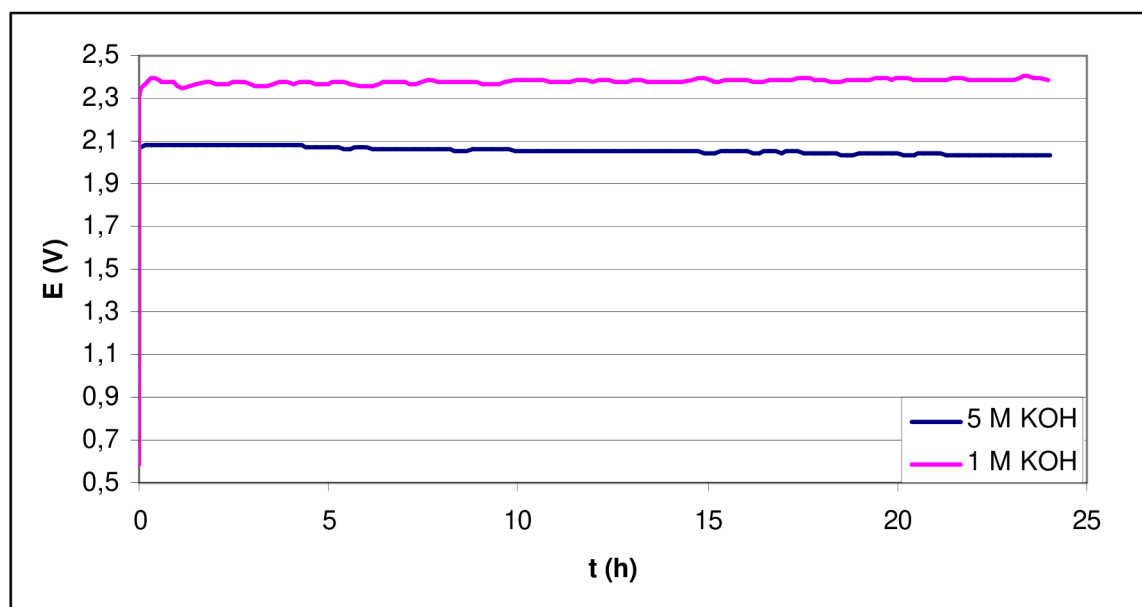
Obr. 15: Závislost potenciálu na době elektrolýzy pro 1 M KOH pro měřené membrány

Na obr. 15 je zobrazena závislost potenciálu na čase. Při použití 1 M roztoku KOH dosáhla nejnižšího potenciálu membrána PDC 95 a naopak nejvyššího potenciálu membrána KAV V. Křivky nemají stálý průběh, což je způsobeno bublinkami, které se hromadí u membrány a tím zvyšují odpor elektrolytu. Proto dochází ke vzrůstu potenciálu. Membrána obsahuje pravděpodobně malé procento vodivé složky, tudíž se chová částečně jako elektroda.



Obr. 16: Závislost potenciálu na době elektrolýzy pro 5 M KOH pro měřené membrány

Na obr. 16 je srovnání membrán pro 5 M roztok KOH. Z grafu vyplývá, že nejnižší potenciál má membrána PDC 95, nejvyšší pak membrána AMH5E-HD.



Obr. 17: Srovnání 1 M a 5 M roztoku KOH pro membránu PDC 95

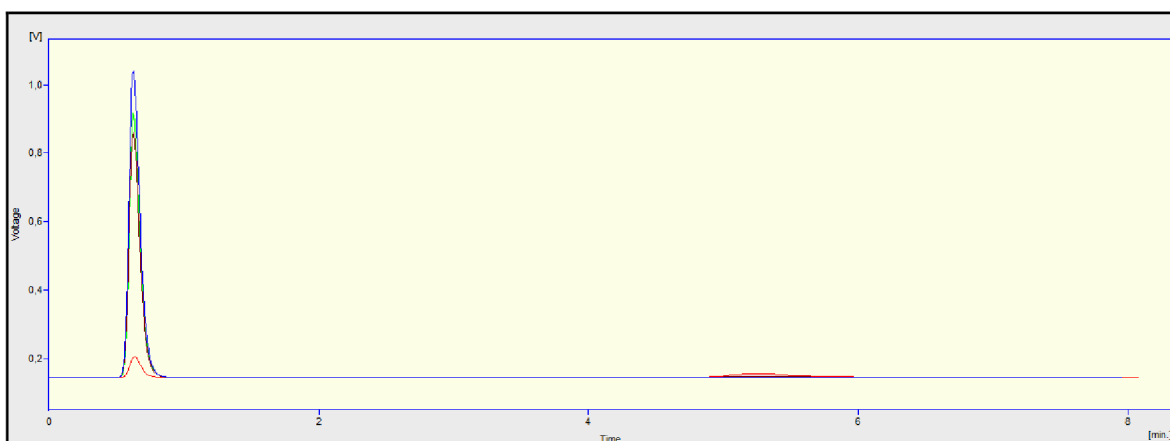
Na obr. 17 je srovnání 1 M a 5 M roztoku KOH pro membránu PDC 95. Při použití 1 M roztoku KOH dosáhla membrána v průměru potenciál 2,34 V a u 5 M roztoku je průměrná hodnota 2,04 V, což znamená pokles o 0,3 V.

Nejnižší hodnota potenciálu má membrána PDC 95 u 1 M i u 5 M roztoku KOH ze všech membrán. Jak z předchozích měření vyplývá, zvyšování koncentrace roztoku hydroxidu draselného vede ke snížení potenciálu na elektrolyzátoru. Je to způsobeno tím, že se vzrůstem koncentrace klesá odpor elektrolytu. Největší pokles potenciálu v průběhu celého měření má membrána FIT POP II v případě 1 molárního roztoku KOH.

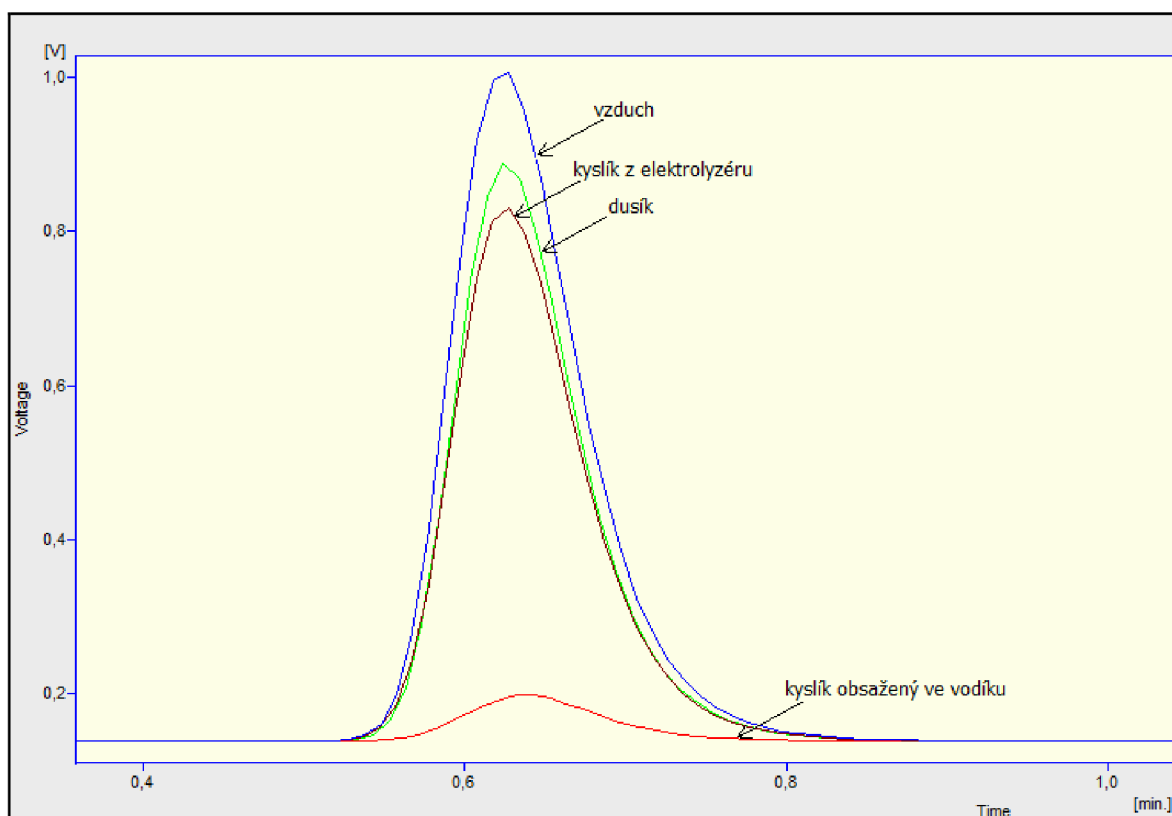
7 Měření na plynovém chromatografu

Měření na plynovém chromatografu bylo provedeno pro všechny výše měřené membrány laboratorním přístrojem CHROM 5B. Zde zobrazené chromatogramy jsou pro membrány PDC 95, VPK PES/SOL a FIT PES II. Toto měření bylo provedeno, aby se zjistila čistota vyrobeného vodíku pomocí elektrolyzáru.

Parametry zaznamenané z chromatografu jsou - teplota termostatu $T = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$, teplota nástřiku vzorku $S = 72\text{ }^{\circ}\text{C}$ a teplota detektoru $D_B = 95\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jako nosný plyn byl použit vodík a jeho průtok činil 5 ml/25 sekund. Odebírané množství vzorku bylo 100 μl .

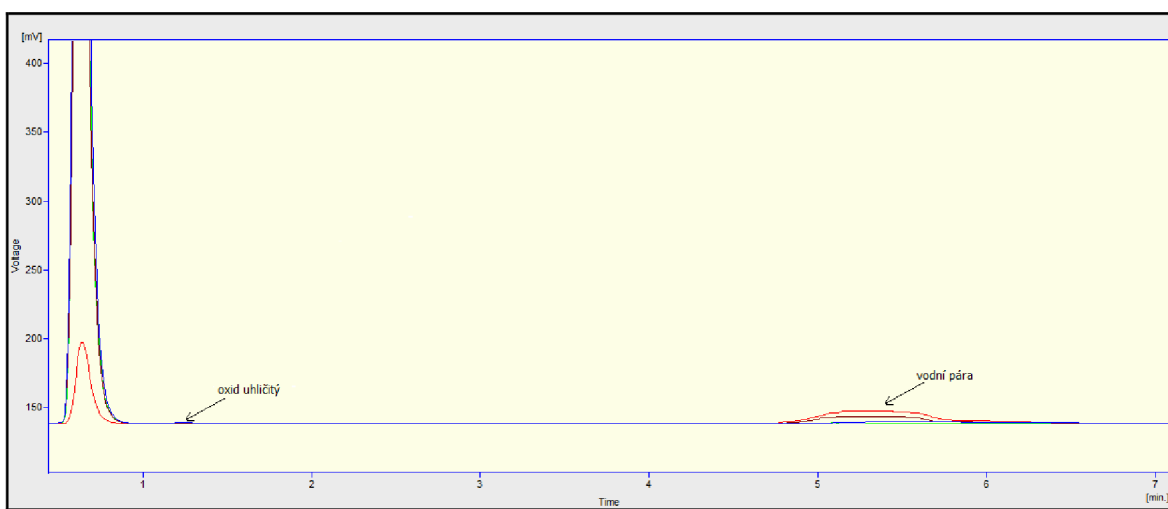


Obr. 18: Chromatogram pro membránu PDC 95



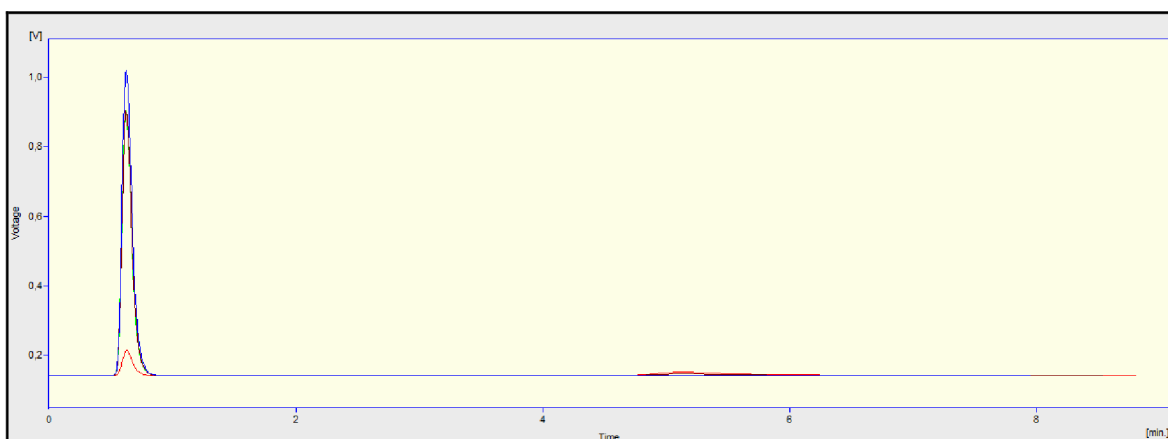
Obr. 19: Detail 1 pro membránu PDC 95

Na obr. 19 je zobrazen detail z chromatogramu pro membránu PDC 95. Největší pík (modrá křivka) je pro vzduch odebraný z místnosti, tento pík má velikost 894,86 mV a skládá se z dusíku a kyslíku. Druhý největší pík (zelená barva) je odebraný dusík, jeho velikost je 749,98 mV. Třetí pík (černá barva) je odebraný kyslík z elektrolyzáru, má velikost 715,31 mV (jeho objem je 80 μl). Poslední nejmenší pík (červená barva) je kyslík obsažený ve vodíku, který byl odebraný z elektrolyzáru. Má hodnotu 65,04 mV (jeho objem je 7,2 μl). Tento pík má cca 11 krát menší hodnotu než kyslík odebraný z elektrolyzáru.

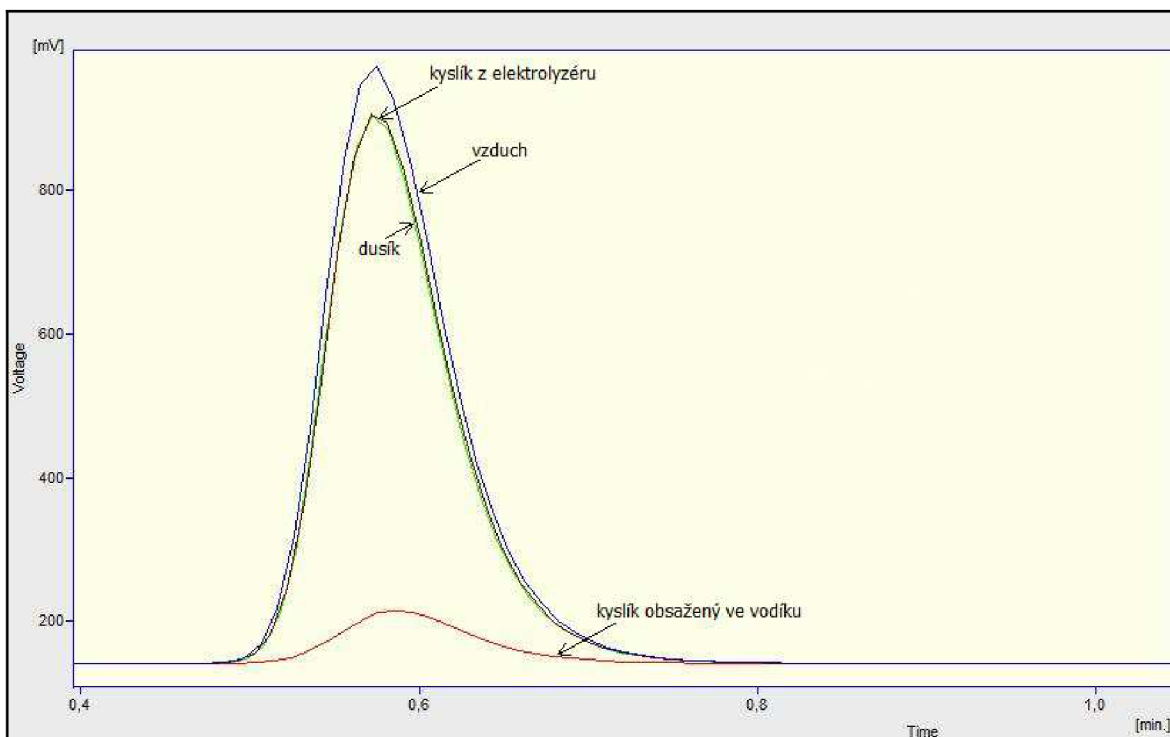


Obr. 20: Detail 2 pro membránu PDC 95

Na obr. 20 je zobrazen detail pro membránu PDC 95. Zobrazený oxid uhličitý je pro vzduch odebraný z místnosti a jeho hodnota činí 0,88 mV. Vodní pára ve vodíku má hodnotu 9,2 mV, v kyslíku 4 mV a ve vzduchu 1,5 mV.

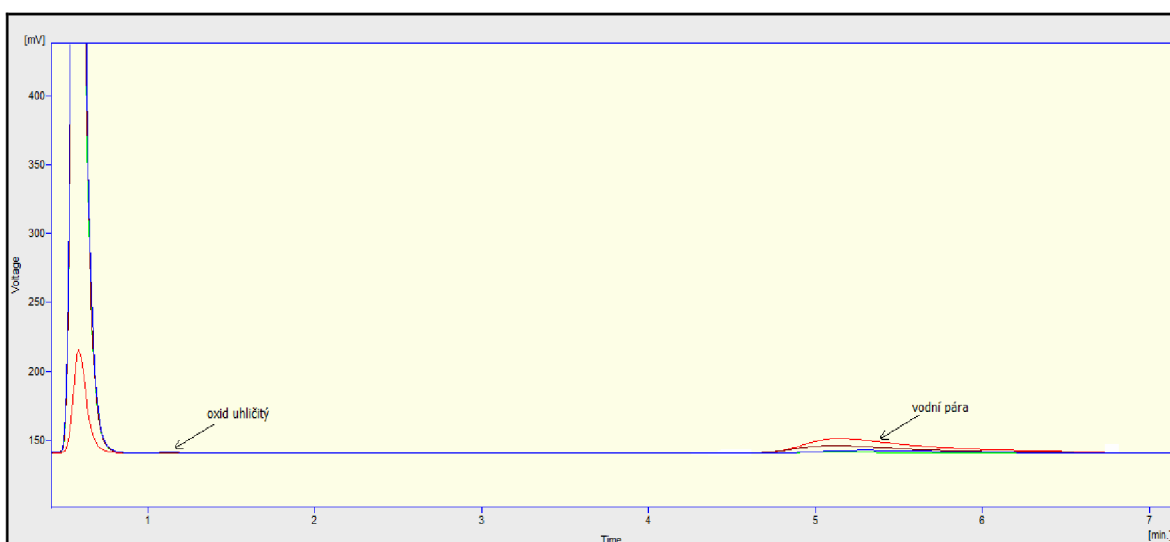


Obr. 21: Chromatogram pro membránu VPK PES/SOL



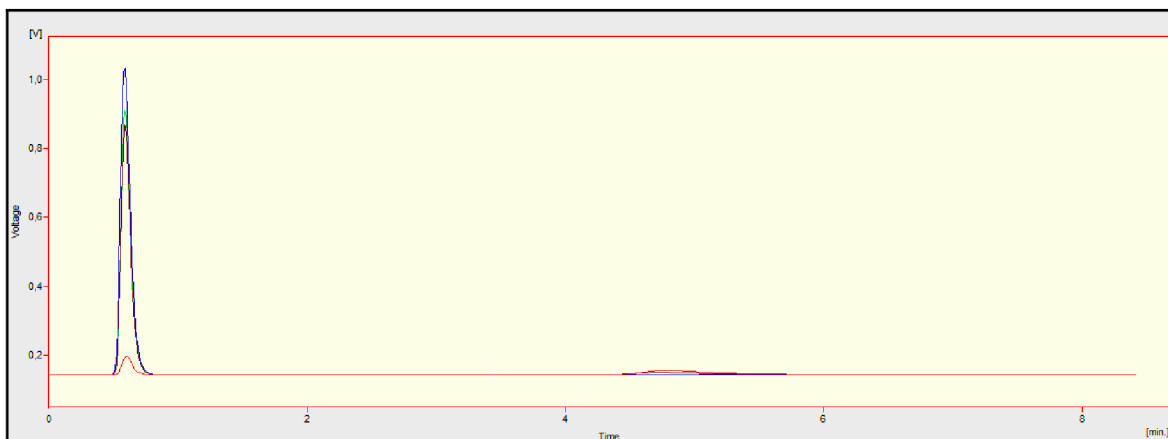
Obr. 22: Detail 1 pro membránu VPK PES/SOL

Na obr. 22 je zobrazen detail z chromatogramu pro membránu VPK PES/SOL. Největší pík (modrá křivka) je pro vzduch odebraný z místnosti, tento pík má velikost 894,86 mV a skládá se z dusíku a kyslíku. Druhý pík (černá barva) je odebraný kyslík z elektrolyzéry, má velikost 766,31 mV (jeho objem je 85,6 μl). Třetí největší pík (zelená barva) je pro dusík, jeho velikost je 749,98 mV. Poslední nejmenší pík (červená barva) je kyslík obsažený ve vodíku, který byl odebraný z elektrolyzéry. Má hodnotu 74,24 mV (jeho objem je 8,29 μl). Tento pík má cca 10,3 krát menší hodnotu než kyslík odebraný z elektrolyzéry.

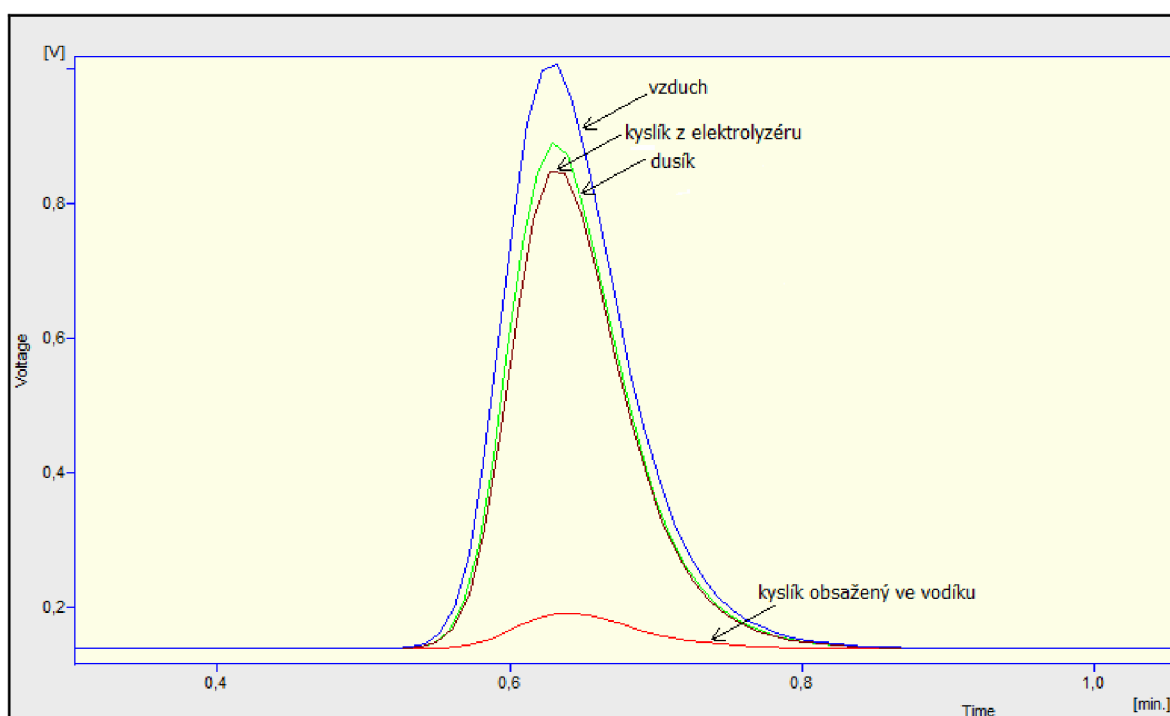


Obr. 23: Detail 2 pro membránu VPK PES/SOL

Na obr. 23 je zobrazen detail pro membránu VPK PES/SOL. Zobrazený oxid uhličitý je pro vzduch odebraný z místnosti a jeho hodnota činí 0,88 mV. Vodní pára ve vodíku má hodnotu 8,6 mV, v kyslíku 4 mV a ve vzduchu 1,5 mV.



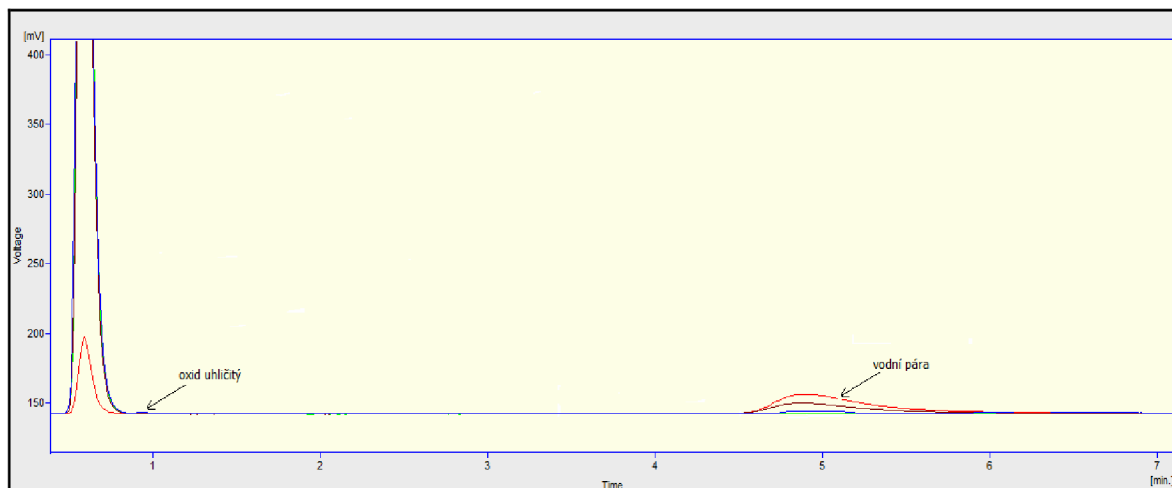
Obr. 24: Chromatogram pro membránu FIT PES II



Obr. 25: Detail 1 pro membránu FIT PES II

Na obr. 25 je zobrazen detail z chromatogramu pro membránu FIT PES II. Největší pík (modrá křivka) je pro vzduch odebraný z místnosti, tento pík má velikost 894,86 mV a skládá se z dusíku a kyslíku. Druhý největší pík (zelená barva) je odebraný dusík, jeho velikost je 749,98 mV. Třetí pík (černá barva) je odebraný kyslík z elektrolyzérou, má velikost 696,18 mV (jeho objem je 77,8 μ l). Poslední nejmenší pík (červená barva) je

kyslík obsažený ve vodíku, který byl odebraný z elektrolyzéry. Má hodnotu 52,66 mV (jeho objem je 5,8 μ l). Tento pík má cca 13,2 krát menší hodnotu než kyslík odebraný z elektrolyzéry.



Obr. 26: Detail 2 pro membránu FIT PES II

Na obr. 26 je zobrazen detail pro membránu FIT PES II. Zobrazený oxid uhličitý je pro vzduch odebraný z místnosti a jeho hodnota činí 0,88 mV a pro vodík 0,4 mV. Vodní pára ve vodíku má hodnotu 13,1 mV, v kyslíku 7,5 mV a ve vzduchu 1,5 mV.

Tab. 9: Srovnání výsledků z chromatografu pro všechny membrány

membrána		pík plynu v (mV)			objem kyslíku v (μl)
PDC 95		N+O	CO ₂	vodní pára	-
	vzduch	894,86	0,88	1,5	
	kyslík	715,31		4	80
	vodík	65,04		9,2	7,26
VPK PES/SOL					
	kyslík	766,31		4	85,6
	vodík	74,24		8,6	8,29
FIT POP I					
	kyslík	681,8		8,1	76,19
	vodík	74,01	0,9	7	8,27
FIT PES II					
	kyslík	696,18		7,5	77,8
	vodík	52,66	0,4	13,1	5,88
KAV V					
	kyslík	765,5		4	85,5
	vodík	72,4		5,8	8,09
SONTARA					
	kyslík	787,8		4,1	88
	vodík	67,76		10,1	7,57
FIT POP II					
	kyslík	715,9		6	80
	vodík	61,8	0,4	12,3	6,9
AMH5E-HD					
	kyslík	738,2		6,1	82,49
	vodík	66,9		10,2	7,47

Jak z daných měření vyplývá, vodík z elektrolyzéru obsahuje kyslík a vodní páru. U membrán FIT POP II a FIT PES II se ve vodíku objevilo CO₂ o velikosti 0,4 mV u membrány FIT POP I 0,9 mV. Nejvíce vodní páry se objevilo u membrány FIT PES II a to 13,1 mV.

8 Stanovení účinnosti

V této části se budeme zabývat výpočtem účinností pro měřené membrány. Srovnáme teoretickou energii, která se spotřebuje na vyrobení určitého množství vodíku se skutečně spotřebovanou. Při výpočtu budeme postupovat z rovnice (12), která uvádí teoretickou energii, jež je potřeba na výrobu 1 m³ vodíku a 0,5 m³ kyslíku. Energii, která byla skutečně spotřebovaná, určíme jako součin napětí a proudu na elektrolyzáru a času, který je potřeba na vyrobení 1 m³ vodíku a 0,5 m³ kyslíku. Změříme, za jaký čas se vyrobí 5 cm³ vodíku, a 2,5 cm³ kyslíku z těchto dvou hodnot zjistíme, za jaký čas se vyrobí 1 m³ vodíku a 0,5 m³ kyslíku.

Největší účinnosti ze všech měřených membrán dosáhla u 1 M a 5 M roztoku KOH membrána PDC 95.

Tab. 10: Výpočet účinnosti pro membránu PDC 95 s 1 M roztokem KOH

PDC 95 - 1 M KOH					
U [V]	I [A]	t (5 cm ³) [s]	t (1 m ³) [h]	W _s	η [%]
2,4	0,4	115	6388,9	6133,3	47,99
3,25	1	44	2444,4	7944,4	37,05
3,7	1,5	30	1666,7	9250,0	31,82
4,2	2	20	1111,1	9333,3	31,53

Tab. 11: Výpočet účinnosti pro membránu PDC 95 s 5 M roztokem KOH

PDC 95 - 5 M KOH					
U [V]	I [A]	t (5 cm ³) [s]	t (1 m ³) [h]	W _s	η [%]
2,1	0,4	120	6666,7	5600,0	52,56
2,55	1	45	2500,0	6375,0	46,17
2,8	1,5	30	1666,7	7000,0	42,05
3	2	22	1222,2	7333,3	40,13

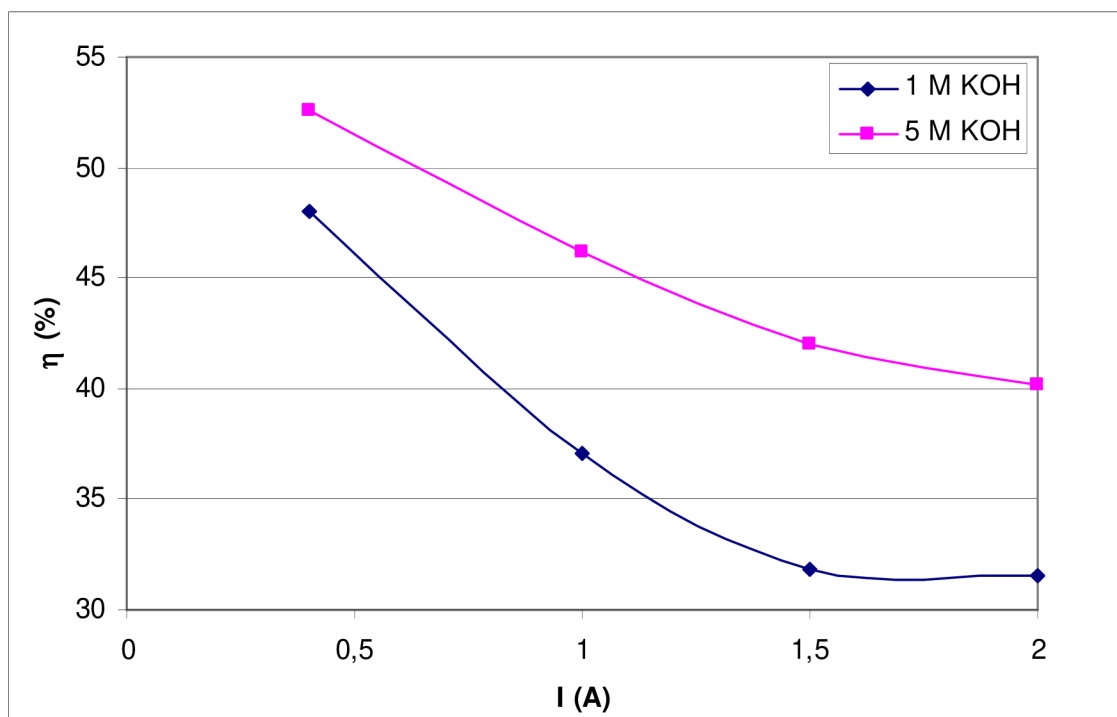
Příklad výpočtu provedeme pro 5 M roztok hydroxidu draselného. Víme-li, že 5 cm³ vodíku a 2,5 cm³ kyslíku se vyrobí za 120 sekund při elektrickém proudu 0,4 A. Z těchto údajů zjistíme potřebný čas na výrobu 1 m³ vodíku a 0,5 m³ kyslíku.

$$W_s = U \cdot I \cdot t_{1m^3} = 2,1 \cdot 0,4 \cdot 6666,7 = 5600 \text{ Wh}$$

Účinnost vypočítáme jako podíl celkové teoreticky spotřebované a skutečně spotřebované energie.

$$\eta = \frac{W_t}{W_s} = \frac{2943,22}{5600} = 0,5256 = 52,56 \%$$

Ze změřených účinností vyplývá, že se vzrůstající proudovou hustotou celková účinnost elektrolýzy klesá, dále jsme se přesvědčili, že se vzrůstající molaritou roztoku KOH dochází ke zvýšení účinnosti. Při použití 1 M roztoku KOH dosáhla účinnosti membrána PDC 95 47,99 % a u 5 M KOH při stejných podmínkách dosáhla účinnosti 52,56 %.



Obr. 27: Graf účinnosti 1 M a 5 M roztoku KOH

9 Závěr

Cílem práce bylo proměřit různé typy membrán a vybrat nejlepší pro použití v elektrolyzátoru vodík - kyslík.

V úvodních měřeních bylo vyzkoušeno, jak se chová elektrolyt bez použití membrány v závislosti na délce elektrolyzy. Zjistili jsme, že dochází k velkému nárůstu potenciálu, je to pravděpodobně způsobené degradací elektrolytu. V dalším měření proto byla provedena výměna elektrolytu vždy ve stanovenou dobu. Tímto měřením bylo zjištěno, že výměna elektrolytu za chodu elektrolyzátoru má vliv na jeho účinnost. Následným měřením s membránami RELAX[®] bylo zjištěno, že dva typy nejsou vhodné pro elektrolyzu a to membrány AM-PAD a CM-PAD. U těchto membrán dochází k velkému růstu potenciálu.

Z měření dlouhodobé elektrolyzy vyplývá, že u membrány FIT POP II dochází k největšímu poklesu potenciálu v průběhu celé doby měření. Dále bylo zjištěno, že se vzrůstající koncentrací KOH elektrolytu dochází k poklesu potenciálu v průměru o 0,32 V.

Při měření na plynovém chromatografu bylo zjištěno, že vodík vyrobený pomocí elektrolyzátoru vykazuje kyslík a vodní páru. Při použití membrány FIT PES II bylo množství kyslíku ve vyprodukovaném vodíku nejmenší, a to 5,88 %. U membrán FIT POP I, FIT POP II a FIT PES II se ve vodíku objevilo zanedbatelné množství oxidu uhličitého, konkrétně 0,044 % z odebraného vzorku u membrán FIT PES II a FIT POP II a 0,1 % u membrány FIT POP I.

Z měřených membrán vykázala nejvyšší účinností membrána PDC 95, a to u 1 M i 5 M roztoku hydroxidu draselného. Při 1 M roztoku KOH bylo dosaženo účinnosti 47,99 % a u 5 M roztoku KOH 52,56 % v obou případech při elektrickém proudu 0,4 A. Ze změřených výsledků vychází, že účinnost klesá se vzrůstajícím proudovou hustotou na elektrodách. Bylo také zjištěno, že se vzrůstající koncentrací elektrolytu vzrůstá účinnost.

Nejlepší vlastnosti ze změřených membrán má membrána PDC 95 při dlouhodobé elektrolyze dosáhla při 1 M i při 5 M roztoku KOH nejnižšího potenciálu a vykázala nejvyšší účinnost.

Měřením na plynovém chromatografu se zjistilo, že komerční membrána AMH5E-HD vykazuje přibližně stejné množství kyslíku ve vodíku jako netkané textilie. Tím bylo zjištěno, že tato membrána je propustná pro plyny.

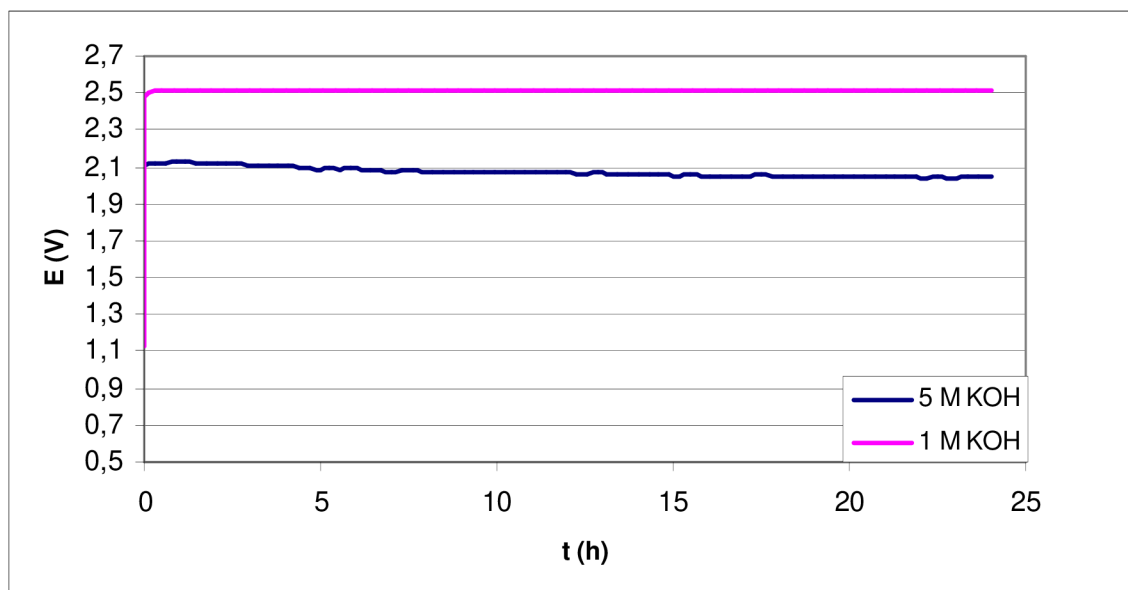
Použití netkaných textilií se ukázalo být perspektivní metodou, jejich výhodou je nízká cena, oproti komerčním membránám např. RELAX[®]. Jak z měření vyplynulo, membrána PDC 95 dosáhla lepších vlastností než komerčně používaná membrána RELAX[®]. Při použití membrány PDC 95 ušetříme zanedbatelné množství energie na výrobu vodíku oproti komerční membráně AMH5E-HD. Např. na výrobu 1 m³ vodíku při proudu 400 mA spotřebujeme 5900 Wh energie při použití membrány AMH5E-HD, zatímco u membrány PDC 95 spotřebujeme pouze 5600 Wh.

10 Literatura

- [1] *Vodík*. Wikipedie, otevřená encyklopedie. [citováno 2008-11-27]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Vod%C3%ADk>
- [2] *Kyslík*. Wikipedie, otevřená encyklopedie. [citováno 2008-11-27]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Kysl%C3%ADk>
- [3] *Elektrolýza*. Wikipedie, otevřená encyklopedie. [citováno 2008-11-27]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrol%C3%BDza>
- [4] *Heterogenní iontoměničové membrány*. Mega a.s. [citováno 2009-4-15]. Dostupné z WWW: <http://www.mega.cz/heterogenni-iontomenicove-membrany-ralex.html>
- [5] KUNOVJÁNEK, M. *Elektrolyzér pro výrobu vodíku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 52 s.
- [6] *Vodíkový autobus s palivovými články*. Výroba vodíku. [citováno 2009-4-15]. Dostupné z WWW: <http://www.h2bus.cz/vyroba-vodiku>
- [7] *Netkané textilie*. Brněnská továrna plstí, s.r.o. [citováno 2010-2-16]. Dostupné z WWW: <http://www.btp.cz/?key=netkane-textilie>
- [8] *Filtrační textilie*. Brněnská továrna plstí, s.r.o. [citováno 2010-2-16]. Dostupné z WWW: <http://www.btp.cz/?key=filtracni-textilie>
- [9] *Sontara*. DuPont CZ s.r.o. [citováno 2010-2-16]. Dostupné z WWW: [http://www2.dupont.com/Czech Republic Country Site/cs CZ/Products and Services/Products/sontara.html](http://www2.dupont.com/Czech%20Republic%20Country%20Site/cs/CZ/Products%20and%20Services/Products/sontara.html)
- [10] ŠEBOR G.; POSPÍŠIL M.; ŽÁKOVEC J. *Technicko – ekonomická analýza vhodných alternativních paliv v dopravě*. 6/2006, [citováno 2010-3-18]. Dostupné z WWW: http://www.mdcz.cz/NR/rdonlyres/F2EF24EF-5E59-42C7-B6C7-A5508CE8F820/0/Technickoekonomicka_analyza_vhodnych_alternativnich_paliv_v_dopravecast_1.pdf
- [11] *Elektrolýza*. [citováno 2010-3-14]. Dostupné z WWW: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/fyz4.htm>
- [12] Brandejská E., Prokeš O., Tenkrát D., *Získávání vodíku z obnovitelných zdrojů*. [citováno 2010-2-26]. Dostupné z WWW: http://oei.fme.vutbr.cz/konfer/biomasa_v/papers/08-Brandejska.pdf
- [13] *Elektrolýza vodného roztoku metanolu*. [citováno 2010-3-18]. Dostupné z WWW: <http://www.sciencedirect.com/science?ob=ArticleURL&udi=B6V3F-4TJ5YJP-3&user=640830&coverDate=11%2F30%2F2008&rdoc=1&fmt=high&orig=search&sort=d&docanchor=&view=c&acct=C000032308&version=1&urlVersion=0&userid=640830&md5=1d4fef6c621574e0eb366ed29cb9f177>

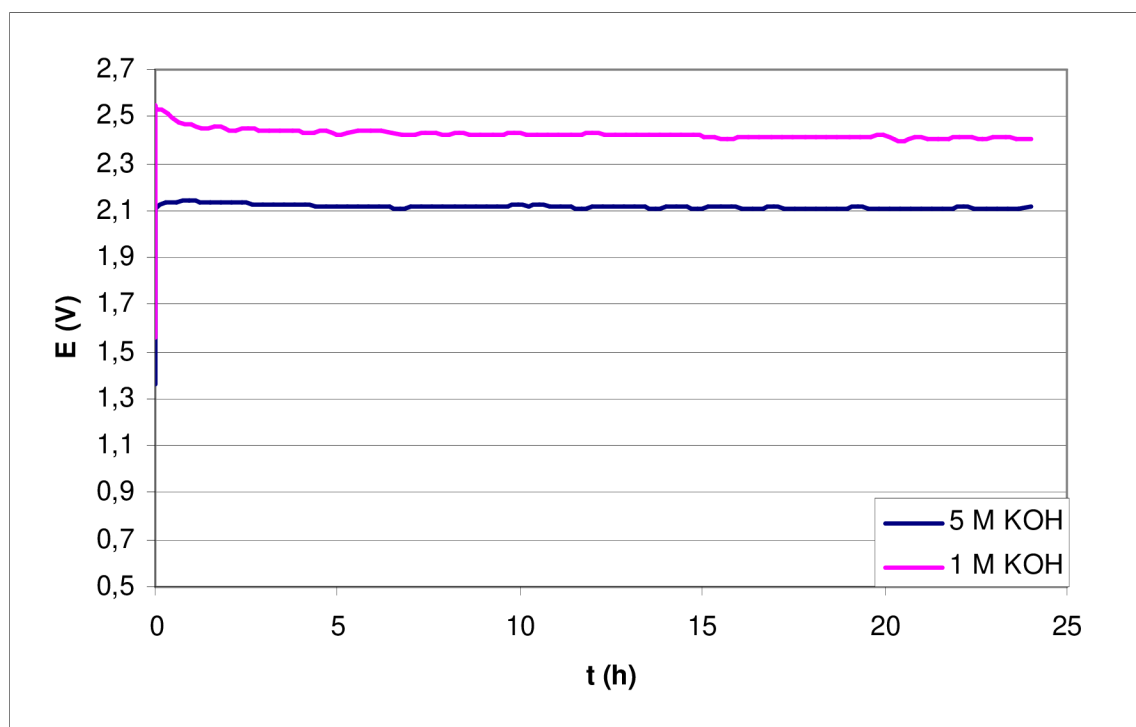
- [14] DEAN J. A., *Chemické dělicí metody*. SNTL, Praha 1974
- [15] Klenovčanová A., Brestovič T., Imriš I., *Vyuzitie fotovoltaiiky na výrobu vodíka elektrolýzou vody*. [citováno 2010-4-07]. Dostupné z WWW: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2010_02_122-129.pdf

Příloha 1:



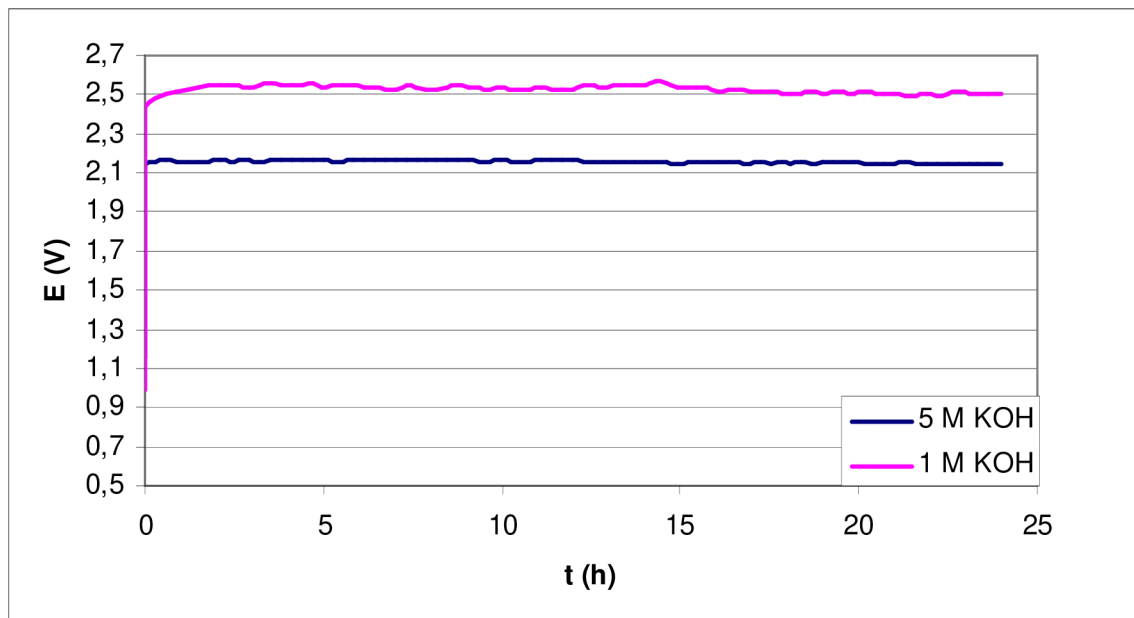
Obr. 28: Závislost potenciálu na čase pro membránu SONTARA

Na obr. 28 je graf závislosti potenciálu na čase pro membránu SONTARA. U 1 M roztoku hydroxidu draselného je průměrná hodnota potenciálu 2,4 V a u 5 M roztoku je průměrná hodnota 2,06 V, což znamená pokles potenciálu 0,34 V. U 5 M roztoku KOH dochází k poklesu potenciálu ke konci měření ve srovnání se začátkem.



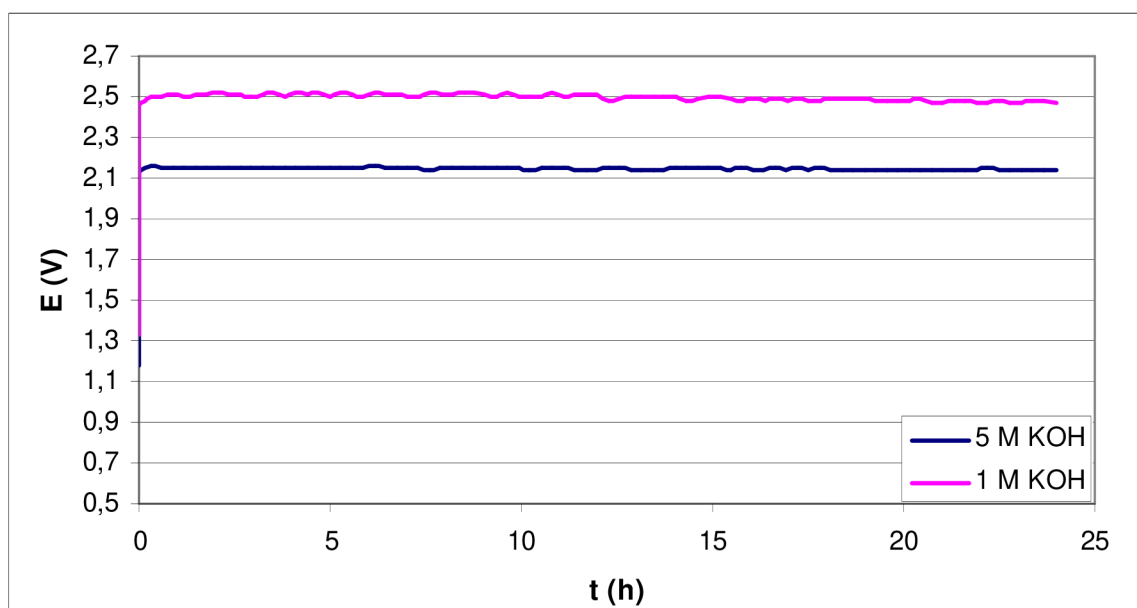
Obr. 29: Závislost potenciálu na čase pro membránu VPK PES/SOL

Na obr. 29 je graf závislost potenciálu na čase pro membránu VPK PES/SOL. U 1 M roztoku hydroxidu draselného je průměrná hodnota potenciálu 2,41 V a u 5 M roztoku je průměrná hodnota 2,1 V, což znamená pokles o 0,33 V. Potenciál je v průběhu celého měření stálý.



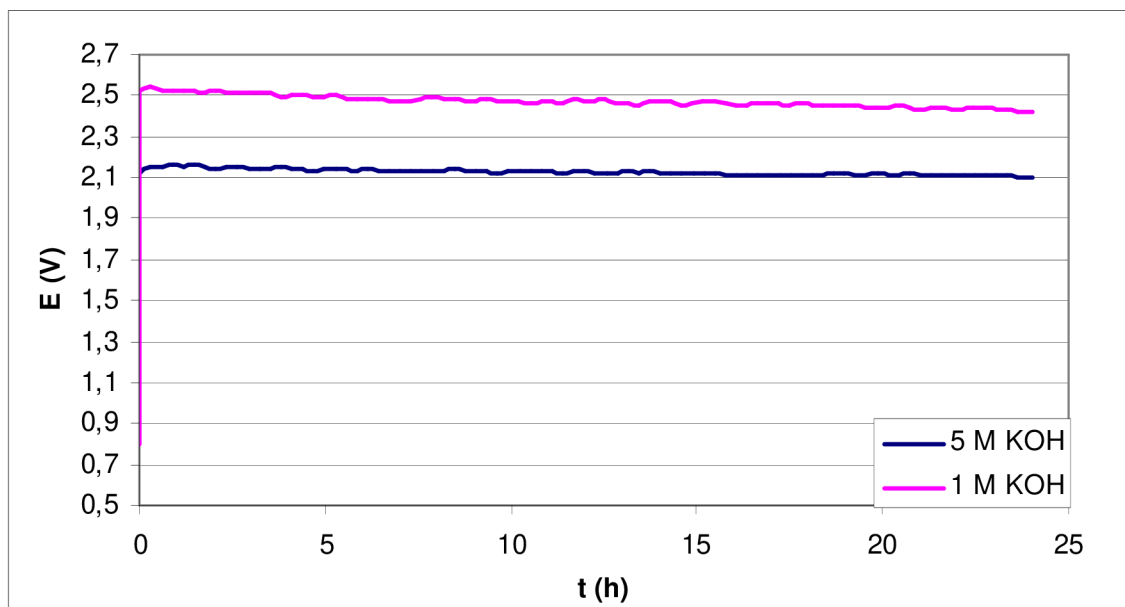
Obr. 30: Závislost potenciálu na čase pro membránu KAV V

Na obr. 30 je graf závislosti potenciálu na čase pro membránu KAV V. U 1 M roztoku hydroxidu draselného je průměrná hodnota potenciálu 2,5 V a u 5 M roztoku je průměrná hodnota 2,14 V, což znamená pokles o 0,36 V. Při 1 M roztoku KOH byl dosažen největší potenciál ze změřených membrán a jak z grafu vyplývá je značně nestálý.



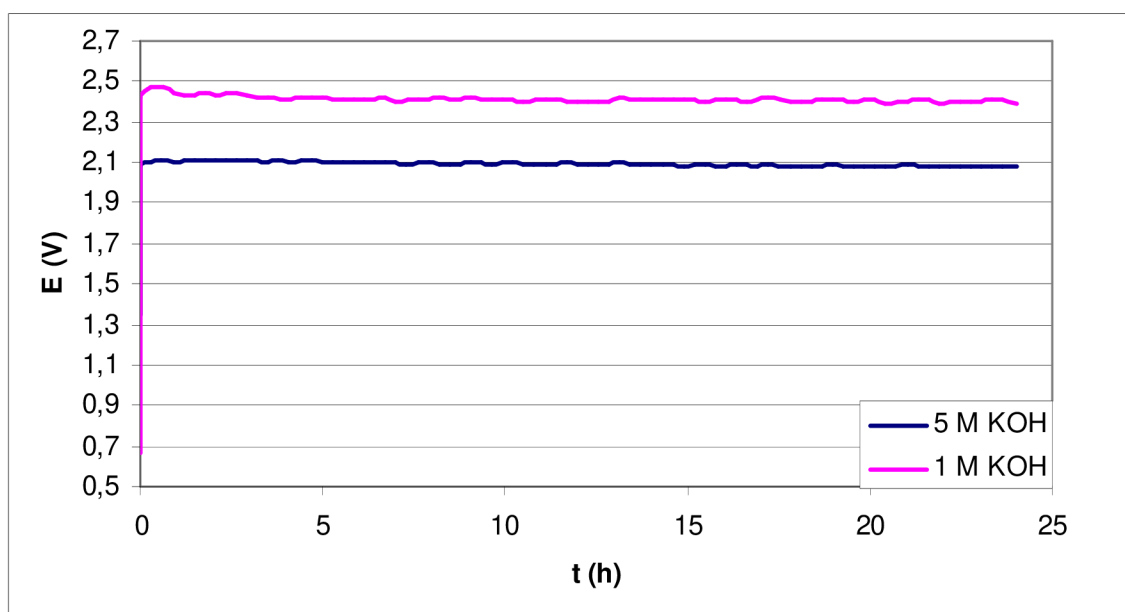
Obr. 31: Závislost potenciálu na čase pro membránu FIT POP I

Na obr. 31 je graf závislosti potenciálu na čase pro membránu FIT POP I. U 1 M roztoku hydroxidu draselného je průměrná hodnota potenciálu 2,48 V a u 5 M roztoku je průměrná hodnota 2,13 V, což znamená pokles o 0,35 V. U této membrány byl potenciál po celou dobu měření stálý.



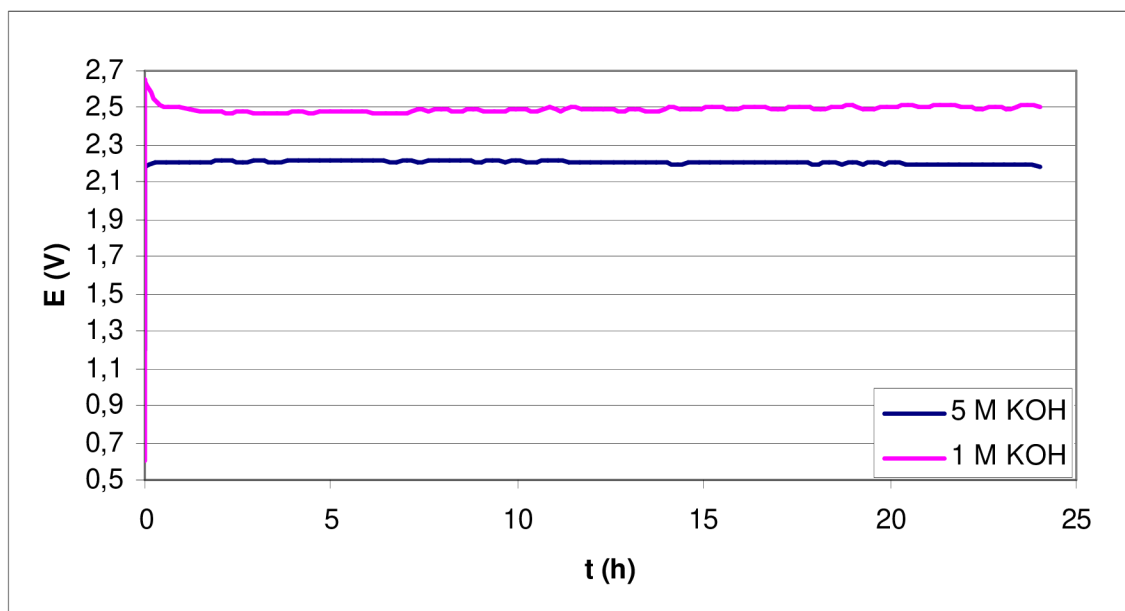
Obr. 32: Závislost potenciálu na čase pro membránu FIT POP II

Na obr. 32 je graf závislosti potenciálu na čase pro membránu FIT POP II. U 1 M roztoku hydroxidu draselného je průměrná hodnota potenciálu 2,45 V a u 5 M roztoku je průměrná hodnota 2,11 V, což znamená pokles o 0,34 V. U obou použitých molarit dochází v průběhu měření k poklesu potenciálu.



Obr. 33: Závislost potenciálu na čase pro membránu FIT PES II

Na obr. 33 je graf závislosti potenciálu na čase pro membránu FIT PES II. U 1 M roztoku hydroxidu draselného je průměrná hodnota potenciálu 2,39 V a u 5 M roztoku je průměrná hodnota 2,08 V, což znamená pokles o 0,31 V. U 5 M roztoku KOH dochází k nepatrnému poklesu potenciálu v průběhu elektrolýzy.



Obr. 34: Závislost potenciálu na čase pro membránu AMH5E-HD

Na obr. 34 je graf závislosti potenciálu na čase pro membránu AMH5E-HD. U 1 M roztoku hydroxidu draselného je průměrná hodnota potenciálu 2,46 V a u 5 M roztoku je průměrná hodnota 2,19 V, což znamená pokles o 0,27 V. Hodnota potenciálu se v průběhu měření prakticky nemění.