



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV CHEMIE A TECHNOLOGIE OCHRANY ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

INSTITUTE OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY OF ENVIRONMENTAL PROTECTION

PROVOZ A OPTIMALIZACE KAPACITNÍ DEIONIZAČNÍ JEDNOTKY

OPERATION AND OPTIMIZATION OF A CAPACITIVE DEIONIZATION UNIT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Vespalec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Mgr. Martina Repková, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK1580/2020 Akademický rok: 2020/21
Ústav: Ústav chemie a technologie ochrany životního prostředí
Student: **Jan Vespalec**
Studijní program: Chemie a chemické technologie
Studijní obor: Chemie a technologie ochrany životního prostředí
Vedoucí práce: **Mgr. Martina Repková, Ph.D.**

Název bakalářské práce:

Provoz a optimalizace kapacitní deionizační jednotky

Zadání bakalářské práce:

1. Zpracování literární rešerše na téma kapacitní deionizace a její využití pro úpravu vody.
2. Na základě literární rešerše provedení optimálního nastavení měření na poloprovozní kapacitní deionizační jednotce pro využití úpravy vody.
3. Analýza a vyhodnocení dat, interpretace výsledků.
4. Shrnutí dosažených výsledků.

Termín odevzdání bakalářské práce: 30.7.2021:

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí bakalářské práce.

Jan Vespalec
student(ka)

Mgr. Martina Repková, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Jiří Kučerík, Ph.D.
vedoucí ústavu

V Brně dne 1.2.2021

prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřená na rozvoj doposud dostupných informací o kapacitní deionizaci v rámci výzkumné činnosti v oblasti separačních metod. V teoretické části jsou rozepsány zákonitosti deionizace, faktory ovlivňující průběh deionizace, možné konfigurace modelu kapacitní deionizace, problematika koroze elektrod, praktické využití a budoucí vývoj kapacitní deionizace. V experimentální části je popsána jednotka kapacitní deionizace umístěna na FCH VUT, dále postup výměny elektrod, kalibrace pH a vodivostních sond a optimální nastavení faktorů ovlivňujících průběh deionizace. V této bakalářské práci byla provedena série měření, která vedla k nalezení optimálního nastavení jednotky.

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on the extension of the information available so far on capacitive deionization within the framework of research activities in the field of separation methods. In the theoretical part, the laws of deionization, factors influencing the course of deionization, possible configurations of the capacitive deionization model, electrode corrosion issues, practical applications and future developments of capacitive deionization are discussed. The experimental part describes the capacitive deionization unit located at the FCH BUT, the procedure of electrode replacement, calibration of pH and conductivity probes and the optimal setting of factors influencing the course of deionization. In this bachelor thesis, a series of measurements were carried out to find the optimal setting of the unit.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kapacitní deionizace (CDI), elektrodová dvojvrstva, odsolování, iontová elektrosorpce, uhlíkové elektrody, vodivost

KEYWORDS

Capacitive deionization (CDI), electrode double layer, desalination, ion electrosorption, carbon electrodes, conductivity

VESPALEC, Jan. *Provoz a optimalizace kapacitní deionizační jednotky*. Brno, 2021. 51 s. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/131383>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie a technologie ochrany životního prostředí. Vedoucí práce Martina Repková.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

.....

podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych upřímně poděkoval vedoucí této bakalářské práce, paní Mgr. Martině Repkové, Ph.D., za trpělivost, vstřícný přístup, odborné vedení, spoustu cenných rad a připomínek v průběhu řešení celé bakalářské práce. Rovněž bych rád poděkoval firmě ASIO, spol. s r. o., za zapůjčení poloprovozní jednotky kapacitní deionizace pro experimentální část této práce.

OBSAH

1	ÚVOD	7
2	TEORETICKÁ ČÁST	8
2.1	Rozpustnost látek ve vodě.....	8
2.2	Princip kapacitní deionizace (CDI).....	8
2.2.1	Faradayovy zákony	9
2.2.2	Elektrická dvojvrstva (ED).....	10
2.2.3	Adsorpce	11
2.2.4	Desorpce	13
2.3	Faktory ovlivňující adsorpci a desorpci	13
2.3.1	Elektrodový materiál	13
2.3.2	Napětí.....	14
2.3.3	Průtok.....	16
2.3.4	Teplota	17
2.3.5	pH	18
2.3.6	Počáteční koncentrace	19
2.3.7	Ionty v roztoku.....	18
2.4	Konfigurace modelů kapacitní deionizace	19
2.4.1	Průtoková CDI.....	20
2.4.2	Membránová CDI	20
2.4.3	Průtoková CDI skrze elektrodu	21
2.4.4	Inverzní CDI	21
2.4.5	Průtoková elektroda CDI	21
2.4.6	Hybridní CDI	22
2.4.7	Kationtová interakce odsolování	22
2.4.8	Bateriové odsolení	22
2.5	Koroze elektrod.....	22
2.6	Praktické použití kapacitní deionizace.....	23
2.7	Vývoj kapacitní deionizace	24
3	CÍLE PRÁCE	25
4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	26
4.1	Použité chemikálie, přístroje, software a pomůcky	26
4.2	Popis kapacitní deionizační jednotky.....	26

4.2.1	Popis přístroje	26
4.2.2	Popis elektrody	27
4.2.3	Výměna elektrod.....	28
4.3	Kalibrace pH a vodivostních sond	29
4.3.1	pH sondy	29
4.3.2	Vodivostní sondy	29
4.4	Optimalizace nastavení jednotky	30
4.4.1	Napětí.....	30
4.4.2	Průtok.....	31
4.4.3	Ostatní ionty	32
4.4.4	Počáteční koncentrace	33
4.4.5	Elektroda.....	34
4.5	Úloha do praktické výuky technologie vody	35
5	ZÁVĚR	36
6	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	37
7	SEZNAM ZKRATEK.....	43
8	PŘÍLOHY	44
8.1	Kalibrační záznamy.....	44
8.2	Napětí.....	46
8.3	Průtok.....	47
8.4	Ostatní ionty.....	48
8.5	Počáteční koncentrace.....	49
8.6	Elektrody.....	50

1 ÚVOD

Voda je nejdůležitější látkou na Zemi a zároveň i jedinečný druh rozpouštědla. Je schopná rozpouštět více polárních látek než kterýkoliv jiný druh rozpouštědla. Skrze vodu člověk dostává spoustu živin a minerálních látek, ačkoliv v ní mohou být rovněž rozpuštěny těžké kovy a další látky tělu škodlivé. Na planetě Zemi existují místa, kde čistá pitná voda je vzácností. Na těchto místech je potřeba přítomnou znečištěnou vodu upravovat.

S rostoucí populací a jejími potřebami na pitnou vodu se postupem času vyvíjely procesy pro efektivní čištění, respektive odsolení vody. V současnosti existuje více procesů k úpravě vody. Nejvíce se používají membránové procesy, a to konkrétně reverzní osmóza. Použit se dají i zařízení na iontovou výměnu a nakonec lze použít i destilaci. Se stoupajícími nároky na kvantitu a kvalitu vody se rozvíjejí i nové procesy čištění vody. Jeden ze široce diskutovaných procesů je kapacitní deionizace (CDI). Metoda CDI by měla nabídnout řešení pro ekonomické a efektivní odsolování vody. CDI je vhodná pro zředěné systémy, tedy se hodí jako sekundární čistící proces [1–3].

Elektrochemické separační procesy se čím dál tím více rozvíjejí. Statistiky uvádí, že počet nových studií zaměřených výhradně na CDI se zdvojnásobí každého 2,5 roku. Právě elektrochemické separační procesy nabízejí potenciál efektivnějšího a ekonomičtějšího čištění vody, avšak doposud s určitými technologickými nedostatky [4, 5].

Tato bakalářská práce obsahuje ucelené informace o zákonitostech deionizace, faktorech ovlivňujících průběh a možné konfigurace modelu kapacitní deionizace. Práce se zabývá experimentálním ověřením a optimalizací provozu poloprovozní kapacitní deionizační jednotky.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Rozpustnost látek ve vodě

Rozpustnost látek ve vodě určuje polarita vazeb mezi atomy. Vazby dělíme na nepolární, polární či iontové, a to podle rozdílu elektronegativit jednotlivých vázaných atomů. Polární a iontové látky jsou rozpustné v polárních rozpouštědlech, jako je například voda. Voda jako polární, „univerzální“ rozpouštědlo je schopná rozpouštět většinu polárních a iontových sloučenin. Rozpustnost je ale omezená, po nasycení vodného roztoku se již více látky nerozpustí. „*Koncentrace nasyceného roztoku určité látky při určitých fyzikálních podmínkách (teplotě, tlaku) se nazývá rozpustnost této látky.*“ [6]. Pro určení rozpustnosti slouží tabelované hodnoty součinu rozpustnosti [6, 7].

Ve všech přírodních i odpadních vodách jsou obsaženy různé koncentrace kationtů alkalických kovů, kovů alkalických zemin, přechodných kovů a amonných kationtů (NH_4^+). Anionty tvořící sloučeniny s uvedenými kationty jsou ve vodách přítomny například ve formě: oxidů (O^{2-}), hydroxidů (OH^-), fosforečnanů (PO_4^{3-}), uhličitanů (CO_3^{2-}), síranů (SO_4^{2-}), siřičitanů (SO_3^{2-}), sulfidů (S^{2-}), halogenidů (F^- , Cl^- , Br^- , I^-), dusičnanů (NO_3^-), dusitanů (NO_2^-), chloristanů (ClO_4^-) a chlorečnanů (ClO_3^-) [6, 8].

2.2 Princip kapacitní deionizace (CDI)

První návrh přístroje využívajícího elektrosorpci je popsán v publikaci *US Pat. 820482, 1904* [9]. K většímu rozvoji kapacitní deionizace dochází od roku 1960, kdy je ve studii [10] podrobně rozepsán základní princip odsolování pomocí adsorpce na elektrodách. Ve studii je porovnána efektivita odsolování odlišných uhlíkových materiálů pro deionizaci a schematicky znázorněný článek kapacitní deionizace [10]. Ve studii pokračoval G. W. MURPHY a roku 1966 vyšla další studie [11]. V ní byly pro deionizaci použity komerční materiály a byly měřeny adsorpční kapacity tohoto materiálu. Je zde i rozkreslený článek CDI jednotky [11].

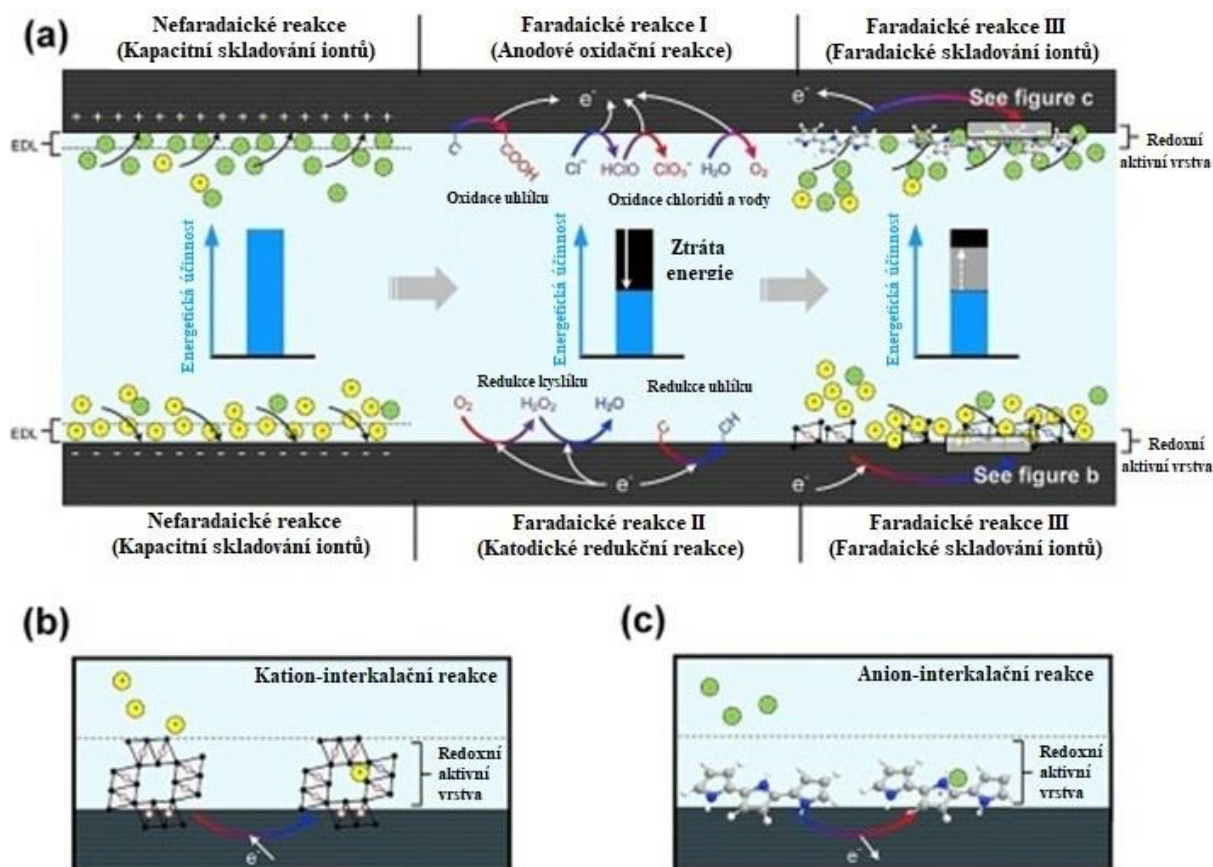
Princip kapacitní deionizace je velmi prostý. Mezi dvě elektrody se aplikuje napětí a disociované ionty v roztoku jsou nuceny migrovat k sobě opačně nabitým elektrodám. Z protékajícího elektrolytu se vlivem elektrosorpce ukládají ionty do elektrické dvojvrstvy v mikropórech a makropórech. Kationty jsou přitahovány k záporně nabitě elektrodě a anionty jsou přitahovány ke kladně nabitě elektrodě. Ionty jsou adsorbovány na povrchu elektrod, a tím je snížena jejich koncentrace ve výstupním roztoku. Při naplnění kapacity elektrosorpce jsou elektrody zkratovány nebo je na elektrody vložen opačný potenciál. Nastává desorpce iontů z povrchu zpět do roztoku a na výstupu dostáváme zvýšenou koncentraci roztoku. Výsledkem je střídavě vytékající zředěný roztok a koncentrát z elektrochemického článku [1, 2, 12–14].

Tím nejpodstatnějším v kapacitní deionizaci jsou elektrody. Elektrody se vyrábí z levných materiálů a mají vysokou měrnou povrchovou plochu pro adsorpci. Materiál elektrod musí mít vhodnou distribuci pórů, aby dokázal zachytit veškeré typy iontů. Dále musí mít elektrody určitou životnost. Všechny tyto faktory ovlivňují celkovou efektivitu kapacitní deionizace. Jako nejefektivnější elektrodový materiál vychází uhlíkové elektrody, ale jejich zpracování

se liší. K použití jsou vhodné například: uhlíkové nanotrubičky, uhlíkové aerogely, grafen a tkanina s aktivním uhlím [15–17].

2.2.1 Faradayovy zákony

Tyto zákony popsal roku 1833 M. FARADAY. Faradayovy zákony popisují přenos elektrického náboje v elektrolytu na elektrody. Přenašečem náboje jsou ionty. Pomocí těchto zákonů lze popsat rozklad vody – elektrolyzu. První zákon určuje, kolik látky se vyloučí na elektrodě nebo v roztoku při průchodu konstantního proudu za jednotku času [18].



Obrázek 1: Schéma faradaických a nefaradaických procesů [upraveno dle 4]

- **Nefaradaický proces**

Za nefaradaický proces označujeme to, když oxidační stav látky zůstává zachován, ale vlivem náboje je přitahován k povrchu elektrody. Nedochozí k přenosu náboje. Ionty jsou vázány elektrostatickými a adsorpčními silami v elektrodové dvojvrstvě, viz obrázek 1 [1, 4, 18–20].

- **Faradaický proces I a II**

Za faradaický proces považujeme takový proces, když na povrchu elektrod probíhají redoxní reakce, viz obrázek 1. Přenos náboje probíhá z jedné látky do druhé. Tyto reakce odpovídají Faradayovým zákonům. V případě uhlíkových elektrod se na anodě oxiduje uhlík na karboxylovou skupinu, dále se oxiduje voda na samotný dikyslík. V případě, že roztok obsahuje i chlorid, dochází k jeho oxidaci až na chlorečnan. Přes peroxid vodíku dochází

na katodě k redukci dikyslíku na vodu. Rovněž dochází k redukci uhlíku, kdy probíhá hydrogenace a vzniká C-H skupina [1, 4, 18–20].

- **Faradaický proces III**

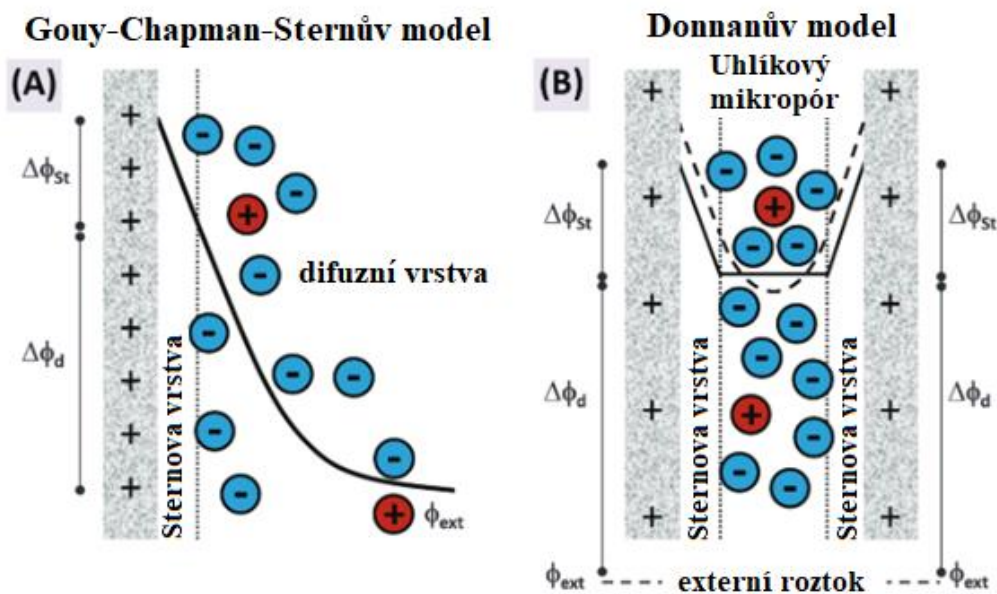
Prostřednictvím redoxních reakcí je možné ukládání iontu do krystalografických míst interagujícího materiálu elektrod. Tento proces se zásadně liší od nabíjení elektrické dvojvrstvy a sorpci iontů uvnitř. Ukládání iontu probíhá na materiálech, obsahujících přechodné kovy nebo vodivé polymery. Na obrázku 1 je znázorněno ukládání kationtů (b) a aniontů (c) [4, 18–20].

Elektrochemický článek lze rozdělit na více typů. Každý může být použit na stejnou aplikaci, ale s odlišným průběhem. Existují články složené ze dvou elektrod, kde obě dvě jsou faradaické nebo kapacitní. V případě faradaického článku hovoříme o galvanickém článku. V něm dochází k adsorpci látky na druhou v závislosti na Beketově řadě kovů. V případě kapacitního článku dochází k ukládání částic s určitým nábojem. Tento náboj kompenzuje náboj v elektrické dvojvrstvě. Dále je možné články kombinovat. Jedna elektroda může být faradaická a druhá kapacitní. Také existují pórovité elektrody, které mohou být částečně faradaické a částečně kapacitní [19, 20].

2.2.2 Elektrická dvojvrstva (ED)

Elektrická dvojvrstva se vytváří na rozhraní elektrody a elektrolytu. K vytvoření elektrodové dvojvrstvy dochází v případě nabití elektrody. Vnitřní ED na elektrodě je tvořena vnitřním nábojem a částice jsou přitahovány elektrostatickými a adsorpčními silami. Nad touto vrstvou se nachází druhá vrstva náboje (nazývá se Sternova vrstva), která nese opačný náboj, a částice jsou vázány adsorpčními silami. Za touto dvojvrstvou je pohyblivé rozhraní, kde se nachází ionty s oběma náboji v určitém zastoupení. Studium elektrodové dvojvrstvy se zabývá absorpcí náboje iontů na elektrodě. Při vykompenzování nábojů vnitřní a vnější vrstvy dochází ke ztrátě potenciálu [1, 2, 18, 19, 21].

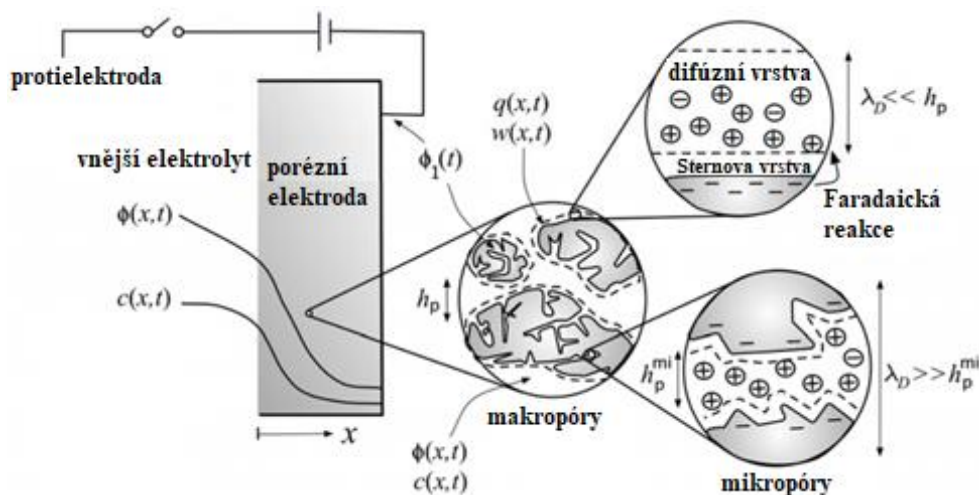
Existuje více modelů elektrické dvojvrstvy, nejběžněji se používá Gouy-Chapman-Sternův model (GCS), přestože experimentálními daty pórovitého uhlíku nejvíce odpovídá modifikovaný Donnanův model (obrázek 2). Donnanův model je jednodušší, protože počítá s tím, že ve všech mikropórech je jedna koncentrace, pouze jeden potenciál a je jednodušší na výpočet. Hlavní rozdíl mezi GCS modelem a Donnan modelem je, že GCS model závisí na ploše pórů a Donnan model závisí na objemu pórů. Na obrázku 2 je znázorněno, jak vypadá elektrická dvojvrstva uvnitř pórů uhlíkové elektrody [1, 2, 18, 19, 21].



Obrázek 2: GCS model a Donnan model elektrické dvojvrstvy [upraveno dle 22]

2.2.3 Adsorpce

Adsorpční mechanismy dělíme do tří skupin: fyzikální adsorpce, chemisorpce a elektrostatická adsorpce. Jak bylo zmíněno již v úvodní části, práce se zaměřuje hlavně na elektrostatickou adsorpci, kde se uplatňují kolumbovské síly. Látka, která se sorbuje, se nazývá adsorbát a adsorbent je materiál, na jehož celém povrchu probíhá adsorpce. Pokud je materiál vysoce pórovitý a nabitý na určitý potenciál, tak se ionty dostávají do makropórů a mikropórů v různém množství. V makropórech je Debye–Hückelova délka mnohem menší, než je střední tloušťka pórů, a tak jsou zde přítomny kationty i anionty. V mikropórech je Debye–Hückelova délka mnohem větší než střední tloušťka pórů, dvojvrstvy se překrývají a do těchto pórů se ionty dostávají hůře, viz obrázek 3. Existují dva typy adsorpce. Adsorpce molekulární, kdy se sorbují nedisociované molekuly nebo oba ionty ve stejné míře, nebo iontová adsorpce, při které se přednostně sorbuje převážně buďto kationt nebo aniont. Iontovou adsorpci dělíme dále na prostou iontovou adsorpci a výměnnou adsorpci. V této práci bude věnována pozornost pouze prosté iontové adsorpci. V praxi dochází k oběma typům adsorpce, a to zejména v souvislosti s časem, kdy dochází k degradaci elektrod. Při prosté iontové adsorpci se adsorbuje jeden druh iontu podle jeho náboje. Kromě nábojového čísla má na adsorpci vliv i hydratační poloměr (hustota náboje), více se tímto tématem zabývá kapitola 2.3.6 [8, 13, 18].



Obrázek 3: Schéma pórovité elektrody a probíhajících procesů na elektrodě [upraveno dle 13]

Adsorpce závisí na polaritě vazby. Polarizované ionty se adsorbují pouze na polární či iontové povrchy. Uplatňují se zde zákony elektrolytické dvojvrstvy, v níž se opačně nabitě ionty sorbují na vnitřní vrstvu a stejně nabitě ionty jsou odpuzovány k opačně nabitému povrchu, viz obrázek 4. Při sorpci se uplatňují elektrostatické a v jisté menší míře i adsorpční síly. Míra adsorbovatelnosti závisí na mocninovém náboji iontu a také na jeho velikosti. Pokud adsorbentem bude elektroda, kterou nabijeme na určitý potenciál, tak uměle vytvoříme elektrolytickou dvojvrstvu, která bude přitahovat opačně nabitě ionty. Tímto způsobem docílíme adsorpce disociovaných iontů z vody. Pro snížení odporu elektrody a k většímu povrchu sorpce se používají vysoce pórovité elektrody, jako je například aktivní uhlí nebo i speciální typy uhlí Kuray. Pro vytváření přesného tvaru elektrody se smísí aktivní uhlí s polymerním pojivem [13, 18, 23].



Obrázek 4: Adsorpce iontů na pórovitou uhlíkovou elektrodu [upraveno dle 1]

Adsorpce neprobíhá vždy rovnoměrně. Dochází k určité selektivitě podle typu látek. Selektivní adsorpci ovlivňuje velmi široké množství faktorů, a to například: aplikované napětí, mocnost iontů, hydratační obal, doba nabíjení, počáteční koncentrace a další. To, který z iontů bude přednostně adsorbován, lze rozhodnout podle faktorů vypsanych v kapitole 2.3 [21, 24–31].

2.2.4 Desorpce

Desorpce je opačný děj adsorpce, dochází k uvolnění iontů z povrchu materiálu. Desorpce a adsorpce je za normálních podmínek vyvážený děj. Ustavuje se určitá rovnováha, kdy je část látky adsorbovaná na adsorbent a část je rozpuštěná v roztoku. Pokud tuto rovnováhu narušíme zavedením potenciálu na elektrodu, docílíme posunu rovnováhy a ionty budou přitahovány k opačně nabitě elektrodě. Desorpce poté docílíme tak, že vyzkratujeme elektrodu, tím se začne utvářet původní rovnováha a ionty se začnou uvolňovat zpět do roztoku. Desorpci je možné urychlit aplikací opačného potenciálu mezi elektrodami. Tím ovšem začne docházet i k adsorpci na opačné elektrodě a může docházet k opětovné sorpci uvolněných iontů. Tomu lze předejít přidáním iontově selektivních membrán, které zabrání průchodu iontů. Membrány však zvyšují náklady elektrod. Různým typům provedení CDI je věnována kapitola 2.4 [4, 13, 23].

2.3 Faktory ovlivňující adsorpci a desorpci

Adsorpce závisí na více parametrech. Hlavním faktorem ovlivňujícím adsorpci je již zmiňovaný povrch materiálu (viz kapitola 2.2.3) a samotný materiál. Pokud je adsorpce nucená a probíhá na elektrodách pod napětím, tak druhým podstatným faktorem ovlivňujícím adsorpci je zavedený potenciál na elektrodu. Mezi další faktory ovlivňující adsorpci můžeme zařadit průtok kapaliny okolo adsorbentu, vliv teploty a pH, vliv ostatních iontů v roztoku a vliv počáteční koncentrace roztoku [15, 32, 33].

2.3.1 Elektrodový materiál

Tato kapitola se zaměřuje na elektrodový materiál a jeho specifické vlastnosti. V kapacitní deionizaci je zapotřebí vysokého měrného povrchu elektrod, proto se využívají uhlíkové elektrody v mnoha variacích.

- Aktivované uhlí (AC)

Aktivní uhlí je levný a dostupný materiál a první z historicky použitých materiálů na adsorpci kontaminantu ze životního prostředí. AC má ale nízkou vodivost a vyšší odpor při přenosu náboje. Díky tomu je vhodným materiálem pro počáteční testování například mechanických vlastností (například tkanina z aktivního uhlí), ale není to vhodný materiál pro další vývoj a použití v kapacitní deionizaci. Pokud však smísíme AC s pojivem a vodivou přísadou, dostáváme materiál s vysokou měrnou velikostí povrchu a vhodnými vlastnostmi. Jako pojivo se používá polyvinyliden difluorid – PVDF – v různém poměru. Se zavedením a zvýšeným obsahem PVDF dochází ke snížení faradaického proudu. Příklady aktivních uhlí s pojivem jsou: Kuraray YP-80F, Kuraray YP-50F, Penta, ColorSorb HP90 a Filtrasorb 400 [4, 15, 16, 23, 34–39].

- Uhlíkový aerogel (CA)

Uhlíkový aerogel je materiál složený ze sférických nanočástic. CA má velkou měrnou povrchovou plochu, dobrou vodivost, příznivou distribuci pórů a vynikající mechanické vlastnosti. Díky dobré struktuře pórů vykazuje nízký odpor toku a vyšší

rychlost adsorpce. Ačkoliv má téměř dokonalé vlastnosti, tak výrobní technologie je náročná a tyto vysoké náklady omezují jeho použití [1, 15, 16, 34, 39].

- Grafen (GE)

Grafen je dvojrozměrná nanostruktura uhlíku s velkým počtem oxidačních funkčních skupin na povrchu. Grafen má deriváty, například oxid grafenu nebo redukovaný oxid grafenu. Grafen je možné nanášet na jiné elektrodové materiály nebo ho převářet na uhlíková nanovlákná, uhlíkové nanotrubičky nebo trojrozměrný strukturovaný grafen. Grafen je ideálním adsorbentem, ale podléhá aglomeraci, a tím se snižuje jeho specifický povrch a také to ovlivňuje vodivost elektrody. Kvůli tomu, aby se zabránilo aglomeraci, se grafen kombinuje s jinými adsorpčními materiály [1, 10, 15, 16, 34, 36, 39, 40].

- Uhlíkové nanotrubičky (CNT)

Uhlíkové nanotrubičky jsou grafénové válce o nano průměru, mají silné aktivní skupiny a dobré strukturní vlastnosti. CNT mají vysokou vodivost a schopnost uchovávat si kapacitu při rychlém nabíjení a vybíjení elektrod. Vícestěnné CNT mají elektrosorpční kapacitu podobnou jiným elektrodám pro CDI. V současnosti mají však uhlíkové nanotrubičky nižší specifickou kapacitu než aktivní uhlí. Avšak CNT má vyšší vodivost než AC. Nedostatky související se specifickou kapacitou lze řešit vývojem kompozitního materiálu CNT obsahujícího aktivní uhlí a vodivé přísady [1, 15, 16, 34, 36, 39, 41].

- Uhlíková nanovlákná (CNF)

Uhlíkové nanovlákná lze použít pro CDI. Jedná se o jednorozměrný uhlíkový nanomateriál s velkou měrnou povrchovou plochou, vysokou elektrickou vodivostí a jedinečnou strukturou. Je možné vytvářet materiál kombinovaný z uhlíkových nanotrubiček a nanovláken CNT-CNF [15, 16, 39].

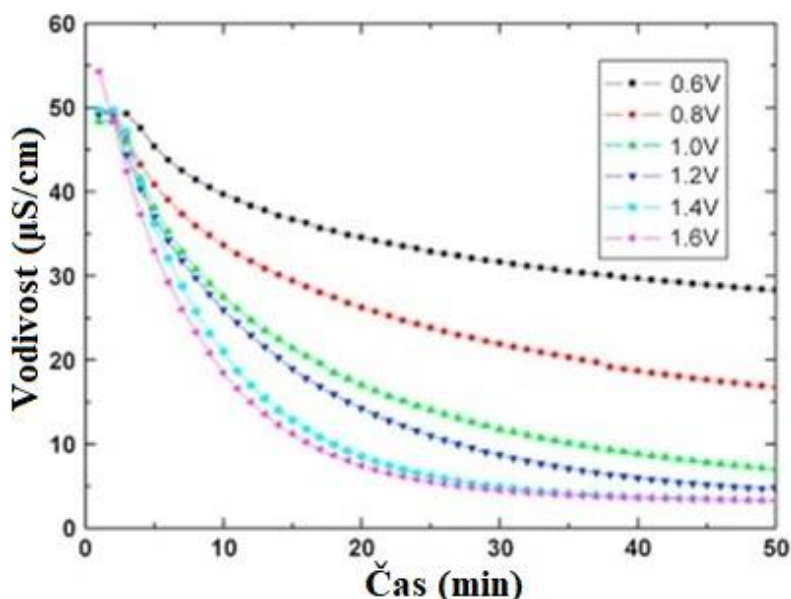
- Úprava materiálu

Materiál elektrod může být rovněž upravován pomocí různých anorganických, organických a polymerních sloučenin. Tyto sloučeniny dodávají materiálu vysokou selektivitu pro sorpci pouze určitých látek. Například článek obsahující poly(1,4-antrachinon) je vhodný pro sorpci CO₂ a článek obsahující sulfonovou katodu je vhodný pro Na⁺. Dále pomocí elektrody z aktivního uhlí potažené aniontoměničovou pryskyřicí dojde ke zvýšení selektivní elektrosorpce fosfátu [21, 24, 25, 28–31, 41, 42].

2.3.2 Napětí

„Elektrické napětí se udává jako napětí mezi dvěma body, mezi kladným a záporným pólem zdroje.“ [43]. Z toho vyplývá, že čím větší bude napětí, tím větší bude rozdíl potenciálu na elektrodách a disociované ionty budou silněji ovlivňovány elektrostatickými silami v elektrickém poli. Se silnějšími elektrostatickými silami roste dosah elektrodové dvojvrstvy, tedy i elektrosorpční kapacita elektrody [15].

Mnohé studie potvrzují, že se vzrůstajícím napětím se zvyšuje elektrosorpce [14–16, 26, 27, 31, 35, 38, 44, 45]. Na obrázku 5 je znázorněno 6 měření s různou hodnotou napětí. Data potvrzují, že se zvyšujícím se napětím roste elektrosorpční kapacita.

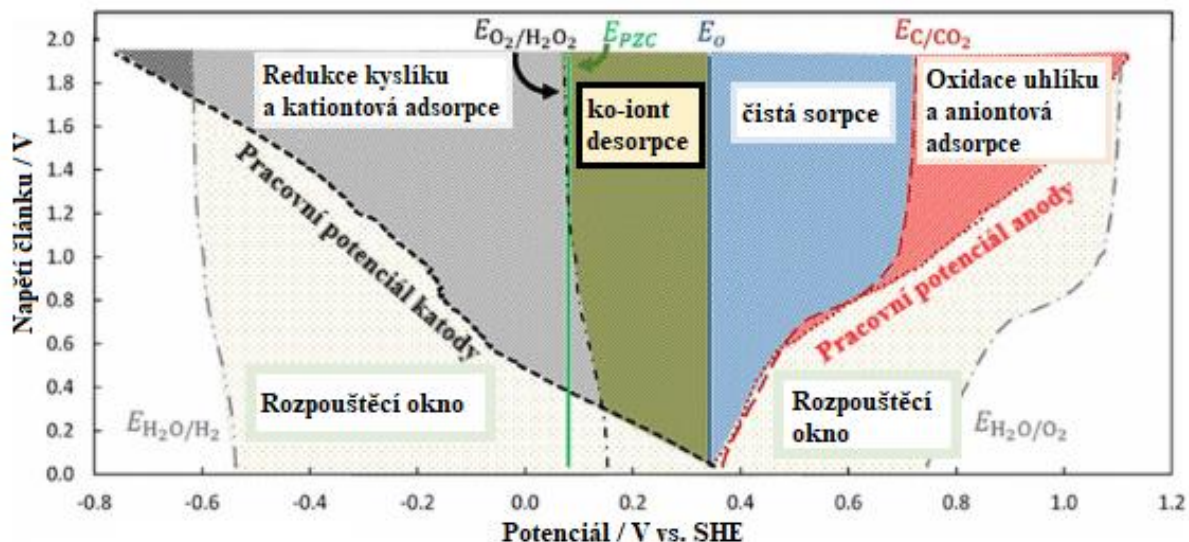


Obrázek 5: Vliv rozdílného napětí na elektrosorpci NaCl pomocí MCDI [upraveno dle 15]

Vlivem zavedení elektrického proudu do roztoku ovšem dochází i k redoxním dějům. Jedním z vedlejších účinků elektrosorpce je elektrolyza vody. Standardní potenciál elektrolyzy vody je 1,23 V, tuto hodnotu ale ovlivňuje více faktorů a není vždy stejná [4, 15]. Redoxních dějů se účastní elektrolyt i elektroda. Uhlíkové elektrody používané při kapacitní deionizaci se oxidují a kyslík rozpuštěný ve vodě, případně vytvořený elektrolyzou, se redukuje. Při oxidaci uhlíku vznikají vlivem faradaických procesů na anodě karboxylové skupiny, jež z dlouhodobého hlediska snižují účinnost elektrody, viz kapitola 2.5. Při redukcí kyslíku vzniká vlivem faradaických procesů na katodě peroxid vodíku, který se následně rozkládá na vodu. Tyto procesy jsou popsány v kapitole 2.2.1 a znázorněny na obrázku 1 [4, 15, 46].

Na obrázku 6 je potenciálová mapa [46], kde byla jako elektroda použita mikroporézní tkanina s aktivním uhlím a byly změřeny potenciály při různých napětích článku. Naměřené potenciály odpovídají přímo danému měření, výsledný potenciál ovlivňuje spousta okolních reakcí. Na ose y je hodnota napětí článku a na ose x jsou jednotlivé potenciály redoxních reakcí. $E_0 = +0,34$ V vs. SHE je klidový potenciál článku. $E_{PZC} = +0,08$ V vs. SHE je potenciál elektrodového materiálu s nulovým nabíjením. $E_{O_2/H_2O_2} = +0,16$ V vs. SHE je potenciál redukce kyslíku na peroxid vodíku. $E_{C/CO_2} = +0,7$ V vs. SHE je potenciál oxidace uhlíku na karboxylovou skupinu. $E_{H_2O/H_2} = -0,8$ V vs. SHE a $E_{H_2O/O_2} = +1,1$ V vs. SHE jsou potenciály elektrolyzy vody. Mapa potenciálu slouží k odhadu faradaických reakcí. Zeleně a modře je znázorněn nefaradaický proces. Zelený prostor znázorňuje desorpci aniontu z katody. Modrý prostor znázorňuje čistou adsorpci aniontu na anodu. Je patrné, že k čisté katodové adsorpci nemůže docházet, neboť samotný potenciál materiálu je na hranici s potenciálem redukce kyslíku. Veškerá elektrosorpce na katodě bude soupeřit s faradaickými

reakcemi. Z obrázku 6 lze vyhodnotit, že nejučinnější napětí se pohybuje okolo 1,2 V. Je to jakýsi kompromis mezi silou elektrosorpce a zabráněním faradaickým procesů. Při napětí 1,2 V se rozloží napětí na 0,1 V oxidační reakce uhlíku; 0,4 V redukční reakce kyslíku; 0,2 V na desorpci aniontů na katodě a 0,4 V na čistou sorpci aniontu na anodě [46].

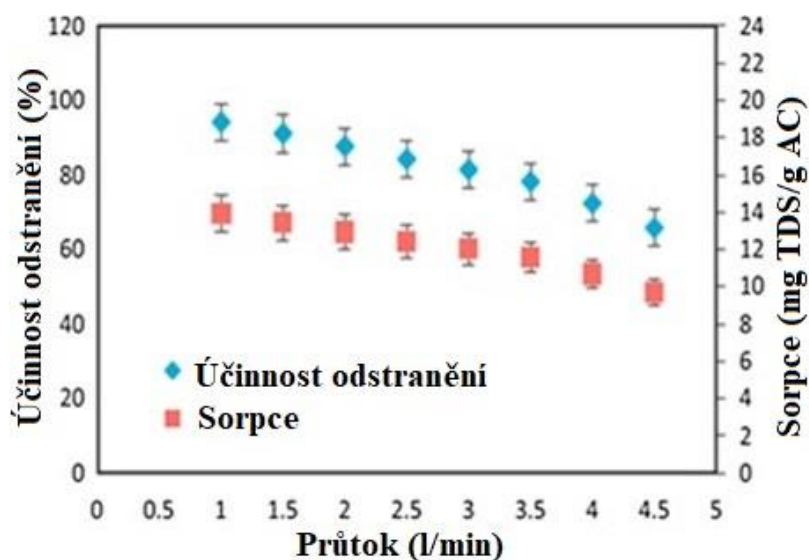


Obrázek 6: Mapa potenciálu elektrodoých procesů se zvyšujícím se aplikovaným napětím článku [upraveno dle 46]

Jiná studie [44] uvádí, že optimální provozní napětí, použité pro adsorpci, je při 0,8 V a pro vybíjení při -0,4 V. Jednotka CDI vykazovala mírně nižší odsolovací kapacitu ($6,3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) než ve srovnání s experimentem 1,2 / 0 V ($7,3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$). Při optimálním napětřovém okně 0,8 / -0,4 V byla inhibována oxidace uhlíku, přičemž byla zanedbatelně snížena výkonnost [44].

2.3.3 Průtok

Průtok ovlivňuje dobu kontaktu iontů a elektrodové dvojvrstvy na povrchu elektrod. Se zvyšujícím se průtokem tedy klesá účinnost adsorpce na povrchu elektrody. Tuto teorii potvrzují i následující data. Na obrázku 7 je na hlavní ose y znázorněna účinnost odstranění v procentech. Na vedlejší ose y je znázorněná kapacita sorpce v miligramech celkově rozpuštěných pevných látek na gramech aktivního uhlí. S rostoucím průtokem na ose x účinnost i sorpce klesá [32].



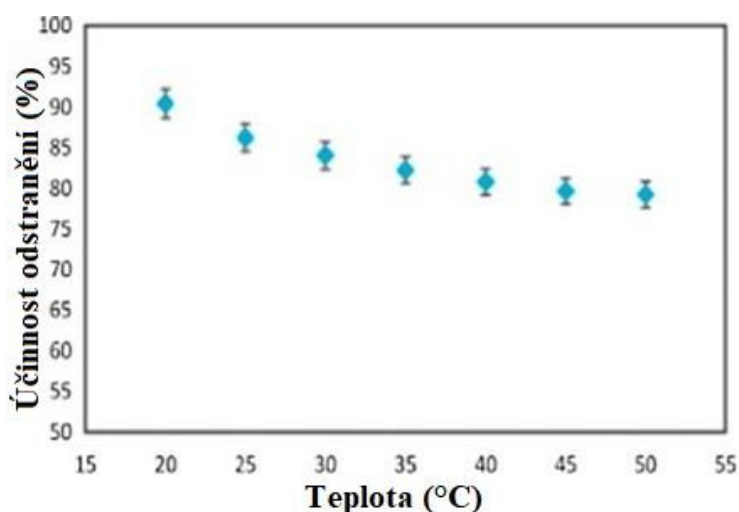
Obrázek 7: Účinnost odstraňování a kapacita elektrosorpce v závislosti na průtoku při teplotě 24 °C a koncentraci TDS 1000 mg/l [upraveno dle 32]

2.3.4 Teplota

Teplota má také určitý vliv na efektivitu sorpce. Se zvyšující se teplotou klesá adsorpční kapacita aktivního uhlí. Tato závislost je obsažena v Arrheniově rovnici (1), kde k_d je rychlostní konstanta desorpce, A_d je před exponenciální faktor Arrheniovy rovnice (za předpokladu, že rychlostní konstanta se řídí touto rovnicí), E_d je aktivační energie pro desorpci, R je molární plynová konstanta a T je termodynamická teplota [32, 47].

$$k_d = A_d \cdot e^{-\frac{E_d}{RT}} \quad (1)$$

Zvyšující se teplotou roztoku se zvyšuje tendence kovových iontů přestupovat z povrchu elektrody zpět do roztoku. Při nižších teplotách přechází struktura mezifázové vody od hydrofobních k hydrofilním reakcím na povrchu aktivního uhlí. Na obrázku 8 je jasně patrný klesající trend efektivitu odstranění v závislosti na rostoucí teplotě [32, 33].



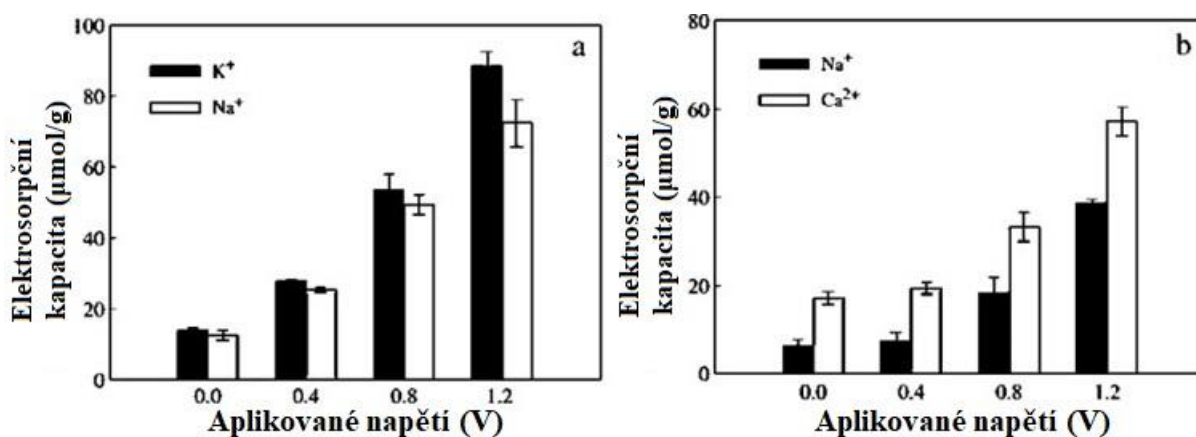
Obrázek 8: Vliv různých vstupních teplot na účinnost odstraňování při průtoku 2 l/min a koncentraci TDS 1000 mg/l [upraveno dle 32]

2.3.5 pH

Při zavedení napětí na elektrodu dochází ke změně pH roztoku, a to hlavně vlivem faradaických dějů. Ke změně dochází převážně v elektrodovém prostoru. Hodnoty pH u elektrod jsou rozdílné od hodnot pH v objemovém roztoku. V blízkosti anody a v blízkosti katody dosahuje pH 2,4 a 10,3 během napětí 1,2 V. Hodnota pH nemá zásadní vliv na elektrosorpci, ale má vliv na degradaci elektrody a na měřenou vodivost. Změny hodnoty pH vedou k problémům s tvorbou vodního kamene na katodě, pokud je přítomno velké množství iontů kovů alkalických zemin, jako je Ca^{2+} nebo Mg^{2+} . Problémy s měřením vodivosti mohou nastat, když hodnota pH stoupne nad 9,3 nebo klesne pod 4,7, potom z článku proudí roztok s NaOH nebo HCl a zkresluje měřenou vodivost soli [4, 15, 46, 48–50].

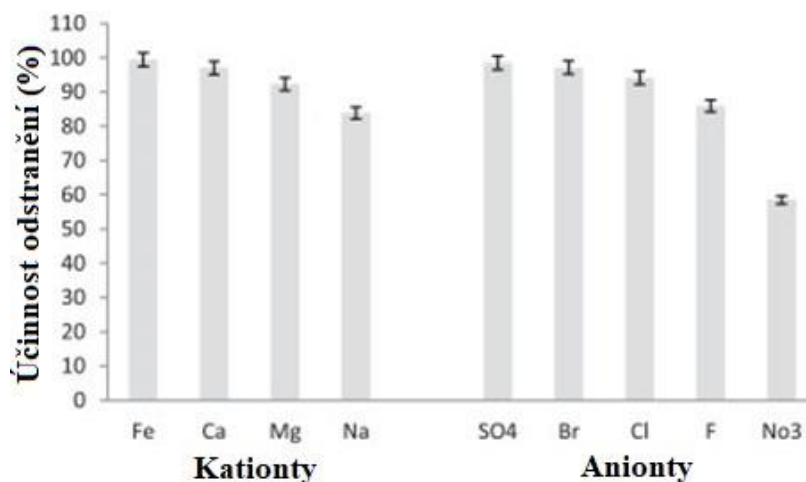
2.3.6 Ionty v roztoku

Sorpce iontu z roztoku obsahujícího více druhů iontů závisí hlavně na iontovém náboji a dále na hydratovaném poloměru a na počáteční koncentraci jednotlivých iontů. Přednostně se sorbují ionty s vyšším nábojovým číslem. Dále se sorbují ionty, které mají menší hydratovaný poloměr, protože mají větší hustotu náboje. Pokud jsou podmínky rovnocenné, závisí na koncentraci jednotlivých iontů. To, zda se budou sorbovat jednomocné, dvojmocné nebo trojmocné ionty, závisí na struktuře a materiálu elektrod. Na elektrodách s malými póry je upřednostňována sorpce jednomocných iontů, protože jednomocné ionty mají menší hydratovaný obal (jednomocné ionty: 4 Å, dvojmocné ionty: 6-7 Å). Pokud se sorbují stejně mocné ionty, bude sorpci ovlivňovat hlavně hydratovaný obal. Při adsorpci iontů s odlišným mocninovým nábojem bude sorpce přednostně řízena kolumbovskými silami. Vícemocný iont bude silněji podléhat sorpci. Tato závislost je vidět i na obrázku 9. Hydratované poloměry: Na^+ : 3,58 Å, Ca^{2+} : 4,12 Å a K^+ : 3,31 Å [8, 15, 32, 35].



Obrázek 9: Rozdílné typy kationtů a jejich elektrosorpce v závislosti na vkládaném napětí na elektrodu [upraveno dle 15]

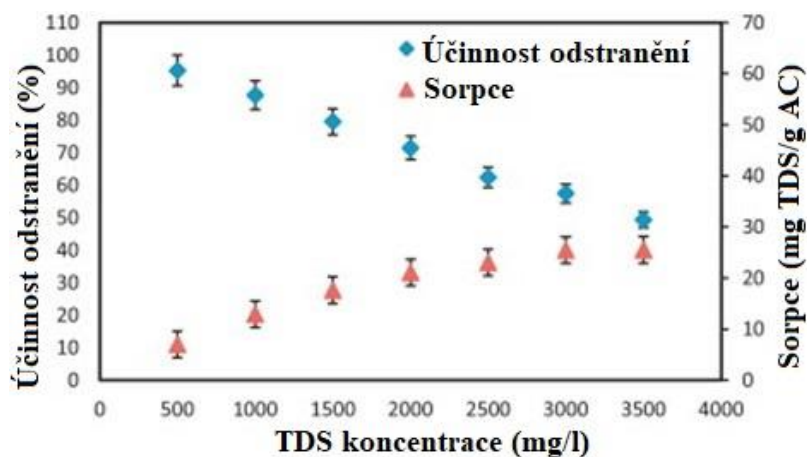
Na obrázku 10 je porovnání efektivity odstranění jednotlivých kationtů a aniontů při sorpci na aktivním uhlí [32].



Obrázek 10: Vliv iontových vlastností na účinnost odstraňování CDI při průtoku 2 l/min, TDS koncentrace 1000 mg/l a teplotě 24 °C [upraveno dle 32]

2.3.7 Počáteční koncentrace

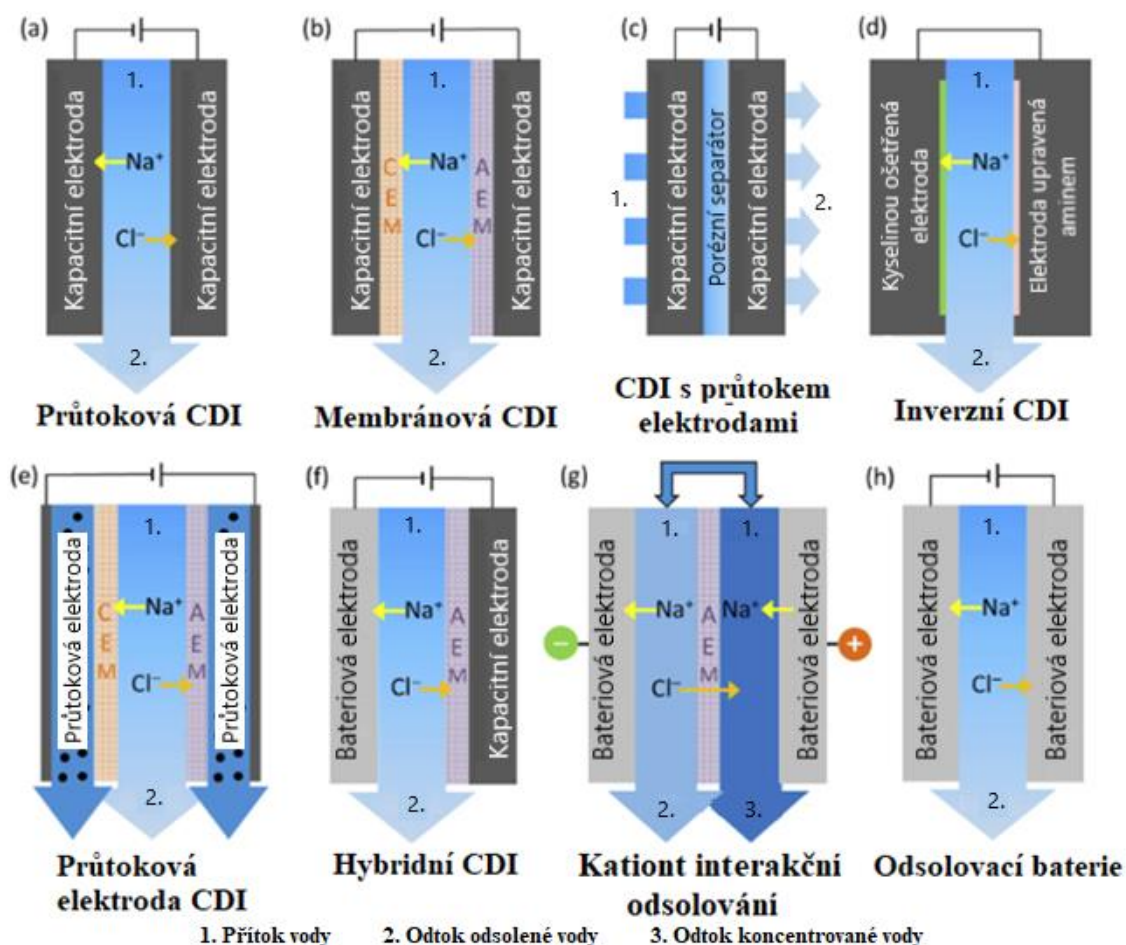
Podle studie [32] má na účinnost odstranění vodivosti vliv vstupní koncentrace roztoku. Z dat vyplývá, že s rostoucí počáteční koncentrací klesá efektivita. Na obrázku 11 je jasně patrné, že účinnost klesá, dále je zde zaznamenán nárůst adsorbovaných iontů v miligramech na gram aktivního uhlí. Sorpce stoupá až na určitou hodnotu, kdy dojde k saturaci elektrod [32].



Obrázek 11: Účinnost odstraňování elektrosorpce a sorpční zatížení elektrod s aktivním uhlím při různých počátečních napájecích TDS při průtoku 2 l/min a teplotě 24 °C [upraveno dle 32]

2.4 Konfigurace modelů kapacitní deionizace

Kapacitní deionizace má mnoho typů výstavby článku. Liší se pouze v modelu elektrod a průtoku roztoku skrze elektrody. Klasifikuje se 8 základních typů kapacitní deionizace, viz obrázek 12, ale přibližně jen dva modely se nejvíce používají. Nejvíce se používá průtoková CDI a membránová CDI. Zbylé elektrody jsou stále ve fázi vývoje, k jejich testování dochází od roku 2010. Každý typ má své výhody a nevýhody v účinnosti, aplikovatelnosti a ceně samotných elektrod [51].



Obrázek 12: Typické modely CDI: (a) Průtoková CDI, (b) Membránová CDI, (c) CDI s průtokem elektrodami, (d) Inverzní CDI, (e) Průtoková elektroda CDI, (f) Hybridní CDI, (g) Kationt interakční odsolování a (h) Odsolovací baterie [upraveno dle 51]

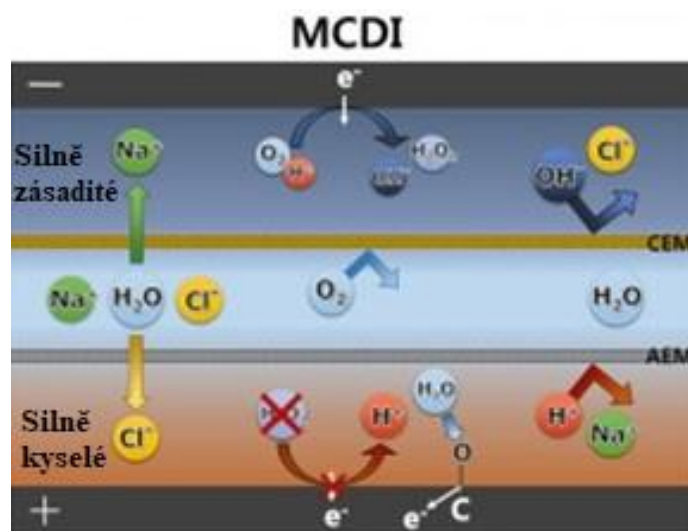
2.4.1 Průtoková CDI

Průtoková kapacitní deionizace byla představena roku 1960 a dala by se nazvat základní kostrou pro ostatní modely. Jedná se pouze o dvě elektrody z uhlíkového materiálu, mezi kterými protéká roztok. Adsorpce je řízena pouze samotným rozdílem potenciálu mezi elektrodami [1, 4, 12, 22, 39, 51].

2.4.2 Membránová CDI

Membránová kapacitní deionizace (MCDI) byla představena roku 2006 a dostala název podle toho, že do článku byly k elektrodám přidány iontové měničové membrány. U katody přibyla katexová membrána, která propouští kationty, a u anody přibyla anexová membrána, jež propouští anionty. Tím se docílí vyššího využití makropórů jako dalšího úložiště pro koiony. Dále je zamezeno sekundární adsorpci na druhou elektrodu při desorpci za použití obráceného napětí [1, 4, 12, 22, 39, 50, 51]. Hassanvand a kol. ve své studii [52] uvádí srovnávací testy průtokové a membránové CDI. MCDI vykazuje zvýšenou adsorpci soli a účinnější desorpci iontů z elektrod. Použitím iontoměničových membrán došlo ke změně pořadí desorpce iontů. Nejprve došlo k desorpci dvojmocných iontů, které byly částečně uloženy v membráně. Dále došlo k omezení změn pH při použití membrán. Další výhodou membránové CDI je omezení účinků nežádoucích faradaických reakcí, a to díky stabilizaci

lokálního pH, čímž se zmírní redukce rozpuštěného kyslíku na katodě a sníží se oxidace uhlíku na anodě. Rovněž nedochází ke generaci peroxidu vodíku, protože kyslík není schopný proniknout přes iontoměničovou membránu, viz obrázek 13 [49, 52, 53].



Obrázek 13: Schematické znázornění úlohy iontoměničové membrány v systému MCDI [upraveno dle 50]

2.4.3 Průtoková CDI skrze elektrodu

Průtoková kapacitní deionizace skrze elektrodu byla představena roku 1970 a je navržena na přímý průtok skrze elektrody. Mezi elektrody je umístěn pórovitý separátor pro oddělení elektrod, aby nedošlo ke zkratu. Vzhledem ke struktuře článku je zapotřebí zvýšeného provozního tlaku a materiálu s převažujícím počtem makropórů. Vlivem menšího množství mikropórů je i menší kapacita elektrod. U tohoto modelu dochází k rychlejší oxidaci katody. Tento model se příliš nepoužívá [1, 4, 22, 51].

2.4.4 Inverzní CDI

Inverzní kapacitní deionizace (i-CDI) byla představena roku 2015. Na povrchu anody je negativní povrchový náboj a na katodě je pozitivní povrchový náboj. Těchto nábojů je docíleno karboxylovými skupinami a oxidovaným křemíkem. Tento efekt by mohl vést k potlačení degradace elektrod. Tento model CDI má ovšem i nevýhodu, a tou je snížení kapacity odstranění z důvodu rozdílné potřeby potenciálu na elektrodách vlivem různých povrchových skupin. Vývoj tohoto modelu doposud neskončil, stále dochází k inovacím a zdokonalování modelu [4, 22, 51].

2.4.5 Průtoková elektroda CDI

Průtoková elektroda kapacitní deionizace (FCDI) byla představena roku 2013 a je založená na MCDI, ale elektrody jsou tvořeny speciální suspenzí uhlíku, skrze kterou kontinuálně protéká roztok a dochází k desorpci. Tento model zajišťuje stabilní produkci odsolené vody. Logicky je výroba takovéto konfigurace složitější, a tím i finančně náročnější než průtoková CDI. Mezi výhody FCDI se považuje odsolování roztoku s vyšší slaností a možná integrace do ostatních systémů odsolování vody, například spojení s neutralizační dialýzou. Celý tento model je velmi efektivní, dosahuje extrémně vysoké míry zpětného získávání vody a rozumné

spotřeby energie. FCEDI je stále na počátku své cesty a je zde možnost k doladění nedostatků a zvýšení odolnosti elektrod [4, 12, 22, 39, 41, 51, 54]. Existují systémy FCEDI, kdy byl ověřen nepřetržitý provoz po dobu 14 dní a během této doby došlo pouze ke zmenšení mikropórů a malé oxidaci elektrody. Avšak po dobu provozu neklesla výkonnost odsolování [55]. Dále byl systém FCEDI otestován pro selektivní extrakci fosfátu z umělých komunálních odpadních vod. Došlo k 61,9 % extrakci fosfátů [56].

2.4.6 Hybridní CDI

Hybridní kapacitní deionizace (HCEDI) byla představena roku 2014 a je složená z jedné kapacitní (nefaradaické) elektrody s iontoměničem, který není vždy vyžadován, a jedné bateriové (faradaické) elektrody. Začlenění bateriové elektrody do CDI je inspirováno narůstajícím polem uskladnitelné energie v lithiium–iontových bateriích. Bateriová elektroda je vyráběna tak, že se kapacitní uhlíková elektroda potáhne malým množstvím stříbra nebo některým oxidem kovu. Mezi hlavní výhody patří vyšší sorpční kapacita pro disociované ionty [12, 22, 51].

2.4.7 Kationtová interakce odsolování

Kationtová interakce odsolování (CID) je založená na bateriovém odsolování, ale s tím rozdílem, že obsahuje anexovou membránu mezi elektrodami. Na jedné straně membrány vzniká deionizovaná voda a na druhé straně koncentrát. Při nabíjení putují ionty k opačně nabitým elektrodám a zároveň probíhá desorpce. Na straně koncentrátu se uvolňují kationty a odchází v koncentrátu spolu s anionty, které projdou membránou. Když je kapacita elektrody na straně odsolené vody zaplněna, dojde k výměně polarity a proces se opakuje [51].

2.4.8 Bateriové odsolení

Bateriové odsolení se skládá ze dvou bateriových (faradaických) elektrod. Před každou elektrodou může být umístěna iontoměničová membrána pro zvýšení blokování koiontů během desorpce. V článku je nastaven konstantní proud namísto konstantního napětí a probíhá nabíjení (adsorpce), dokud se neustálí napětí. Následně je změněna polarita a probíhá vybíjení (desorpce). Tento model se vyznačuje nízkými náklady, nízkou spotřebou energie, vysokou kapacitou odstranění iontových látek a stabilitou výkonu. Jako nejpraktičtější se doposud jeví bateriové články $\text{BiOCl-Na}_{0,44}\text{MnO}_2$. Nevýhodou tohoto modelu je nízká vodivost mezi uhlíkovou elektrodou a aplikovaným speciálním povrchem stříbra nebo oxidem kovu [12, 51].

2.5 Koroze elektrod

Koroze elektrod je hlavní problém kapacitní deionizace. Dochází k ní vlivem faradaických reakcí na elektrodách, které ztrácejí výkonnost odsolování. Jak už bylo popsáno v kapitole 2.3.2, koroze probíhá na katodě. Na anodě dochází k oxidaci uhlíku na karboxylové skupiny, které nesou opačný náboj. Avšak rozpuštěný kyslík nebo peroxid produkovaný na katodě rovněž poškozují elektrodu [4, 57].

Snížením napětí v článku se zbavíme anodické oxidace uhlíku, ale nikoliv působení rozpuštěného kyslíku na katodě. Katodická reakce probíhá vždy, protože potenciál oxidace kyslíku je blízko potenciálu elektrodového materiálu s nulovým nabíjením. Použití membrán

by mohlo být účinným opatřením proti katodické redukci kyslíku. S přidruženým pozitivním posunem elektrodového potenciálu k anodě se navíc snižuje oxidace uhlíkové anody. Jinou metodou k zabránění nežádoucích redukčních reakcí kyslíku na katodě i při nízkém provozním napětí je odstranění rozpuštěného kyslíku před vstupem do článku. Díky tomu se docílí i snížení spotřeby energie, poněvadž napětí nebude spotřebováváno na samotný redoxní proces. Pro podrobnější výsledky je zapotřebí ještě dalších studií na téma koroze elektrod [4, 57].

Jedna ze studií [58] uvádí, že zkrácení doby nabíjení článků může umožnit významně zvýšenou stabilitu elektrod při zachování adekvátní sorpční kapacity, tím by došlo k výraznému prodloužení životnosti a je to možný směr pro optimalizaci [58].

2.6 Praktické použití kapacitní deionizace

Kapacitní deionizace nachází nejčastější využití při odsolování brakických vod na výrobu pitné či zemědělské vody. Jednotky CDI se využívají například na čištění odpadní brakické vody z teplených elektráren nebo na brakické vody s obsahem 5–10 mg/l ropných látek jako je například oktan. Jednotku CDI lze využít k odstranění tvrdosti vody ve vodovodní síti domácnosti. Pro odstranění tvrdosti se využívají upravené elektrody pro selektivní adsorpci Ca^{2+} a Mg^{2+} . Na CDI jednotce lze také odstraňovat slabé kyseliny, jako je kyselina boritá a octová. CDI je vhodná zejména k odstranění Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , těžkých kovů, In^{3+} , dusičnanů a fosfátů. Podle okolností se používají speciálně upravené elektrody pro selektivní adsorpci, například fosfátu nebo cenného prvku In^{3+} , kterého je na planetě Zemi málo. Některé kovové ionty, například měď, mohou podstoupit redukční proces a ve výsledku se ukládají jako elementární měď na elektrody [4, 5, 22, 27, 51, 56, 59].

Kapacitní deionizaci je velmi vhodné kombinovat s jinou technikou, například se solárními panely, a to proto, že na solárních panelech je nízké napětí (přibližně 1 V), které je požadované na elektrodách v CDI. Tyto kombinované solární jednotky CDI lze použít k úpravě vody na vzdálených místech bez přístupu k elektrické síti. Rovněž může být CDI spojena i s jinými systémy na úpravu vody [4, 22, 51, 59]. V jedné ze studií [60] bylo použito integrovaných solárních panelů na provoz membránové kapacitní deionizace. V experimentální mobilní buňce bylo nainstalováno MCEDI a buňka byla osazena solárními panely. Výsledkem experimentu byl systém schopný provozu po dobu 24 hodin bez připojení k síti. Systém produkoval řádově 5 m³/den deionizované vody [60].

Je možné vytvořit hybridní systém RO–CDI. Spojení reverzní osmózy a kapacitní deionizace je možné ve dvou variantách: (1) CDI je využívána pro úpravu permeátu z RO, pro produkci ultra čisté vody a (2) CDI je využívána pro úpravu koncentráту z RO, pro maximalizaci rychlosti zpětného získávání vody [5].

Praktickým využitím se zabývá i tato studie [24], v ní je řešen problém nadměrného uvolňování CO_2 do ovzduší, případně odstraňování CO_2 z uzavřených prostor. Ve studii je popsána výroba a vlastnosti elektrody. Poly(1,4-antrachinon) byl inkorporován do inkoustu s vícečetnými uhlíkovými nanotrubičkami. Z tohoto materiálu byla poté vytvořena elektroda. Materiál elektrody je vyroben tak, že je schopen sorbovat pouze CO_2 nikoliv N_2 [24].

2.7 Vývoj kapacitní deionizace

Za posledních 20 let je kapacitní deionizace hojně diskutované téma a stále více se rozvíjí. Každým rokem přibývá meziročního růstu studií CDI. Předpokládá se příliv nových konfigurací CDI. Do budoucna lze očekávat, že se zpětně bude využívat vybíjecího cyklu pro úsporu energie a dojde k dalšímu zefektivnění CDI. Rovněž dojde k dalšímu rozvoji bateriových elektrod a samotného materiálu elektrod. Budou se dále zkoumat faradaické a nefaradaické procesy na elektrodách pro prodloužení jejich životnosti a zvýšení jejich kapacity. Kapacitní deionizace je slibnou technologií pro úpravu vody a je považována za klíč k řešení celosvětového problému s nedostatkem pitné vody [4, 51].

3 CÍLE PRÁCE

Cílem experimentální části je předat detailní informace o jednotce kapacitní deionizace umístěné na FCH VUT v laboratoři technologie vody, dále je zde obsažen popis výměny elektrodového článku, kalibrace pH sondy a kalibrace vodivostní sondy. Po popsání fyzického stavu jednotky bude následovat popis postupu optimalizace provozu, který bude podložen daty o funkčnosti a jejím optimálním nastavením na provoz. Poslední částí experimentální části je návrh měření na CDI do výuky praktik z technologie vody.

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1 Použité chemikálie, přístroje, software a pomůcky

Chemikálie:

- Destilovaná voda, FCH VUT, Česká republika
- Chlorid vápenatý, Lach-Ner, s.r.o., Česká republika
- Chlorid sodný, PENTA, Česká republika
- Chlorid draselný, PENTA, Česká republika
- Pufř DURACAL pH 4.01, 500 ml, Hamilton Bonaduz AG, Švýcarsko
- Pufř DURACAL pH 7.00, 500 ml, Hamilton Bonaduz AG, Švýcarsko
- Pufř DURACAL pH 10.00, 500 ml, Hamilton Bonaduz AG, Švýcarsko
- Chelaton 3, LACHEMA, Česká republika
- Murexid, LACHEMA, Česká republika

Přístroje, software a pomůcky:

- Předvážky
- Analytické váhy HR-120-EC, A&D Company, Japonsko
- Běžné laboratorní sklo
- 50l barel
- 5l kanystr
- Multi ph/Cond 340i, WTW, Česká republika
- MemoLink ML1400 Knick Elektronische Messgeräte GmbH & Co. KG, Německo
- Kond ADAPT USB-GO, SMARIS s.r.o., Česká republika
- Software MemoSuite 2.1.0.62, Knick Elektronische Messgeräte GmbH & Co. KG, Německo
- Software MV1_KONF, SMARIS s.r.o., Česká republika
- Plamenový fotometr PFP7, JENWAY, Velká Británie
- Poloprovozní jednotka kapacitní deionizace, ASIO, spol. s r.o., Česká republika

4.2 Popis kapacitní deionizační jednotky

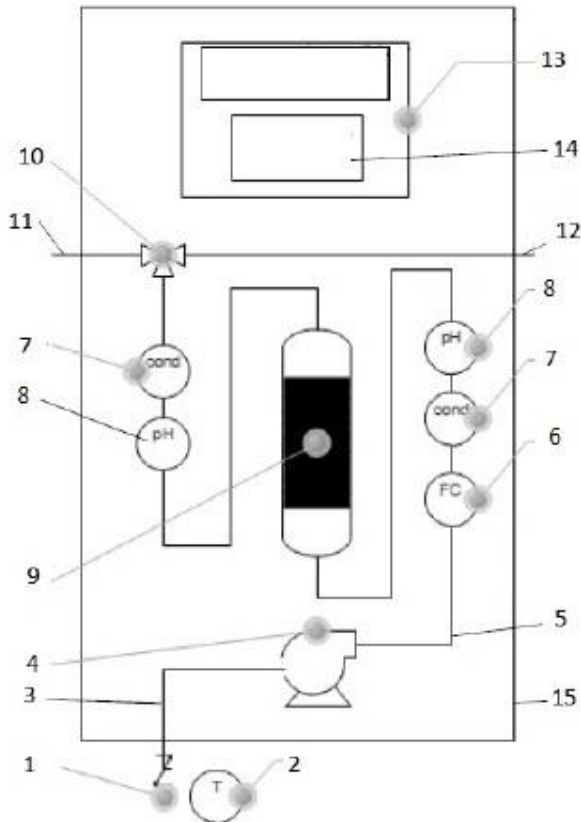
4.2.1 Popis přístroje

Na obrázku 14 a 15 je bodově popsána jednotka CDI. Surová voda určená k odsolení (1) je čerpána čerpadlem (4), jehož výkon je regulován frekvenčním měničem podle požadavku na průtok. Poloprovozní jednotka kontinuálně měří následující parametry:

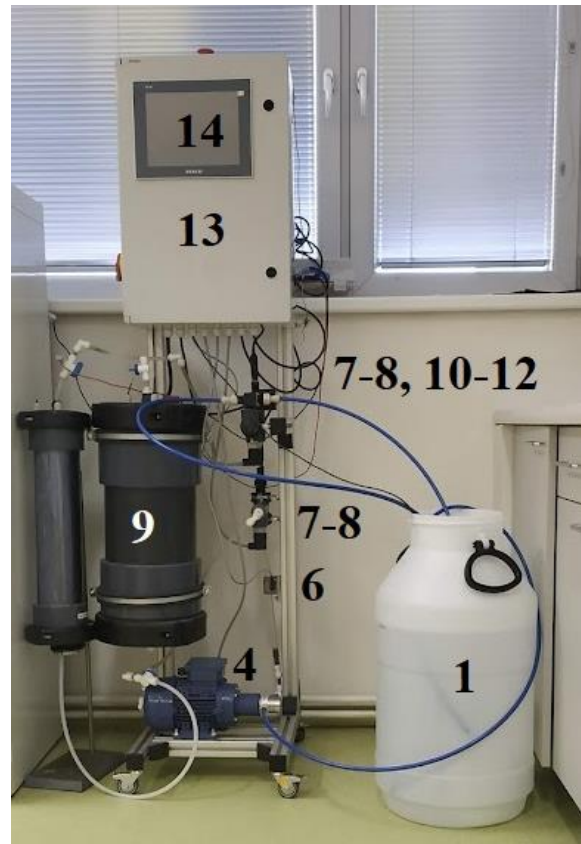
- průtoku pomocí průtokoměru *Sonoflow CO 5.1* od výrobce SONOTEC.
- vodivosti pomocí vodivostní sondy *SV06* od výrobce SMARIS.
- pH pomocí pH sondy *Memosens SE 554* od výrobce KNICK.
- teploty pomocí teplotní sondy *TG 68* od firmy SENSIT.

Po nasátí čerpadlem (4) proudí kapalina přes první vodivostní (7) a pH (8) sondu. Kapalina vtéká do elektrodového prostoru (9) a pokračuje na druhou pH (8) a vodivostní (7) sondu. Na konci je třicestný elektromagnetický ventil (10), který určuje směr proudu kapaliny

na diluát (11) nebo koncentrát (12). Měření teploty probíhá teplotním čidlem (2) mimo uzavřený systém. Toto čidlo lze umístit do jedné z provozních kapalin. Celý systém je řízen centrálním rozvaděčem (13), jenž je napojen na dotykový displej (14) s možností připojení externího zařízení skrze ethernetový kabel.



Obrázek 14: Schéma CDI



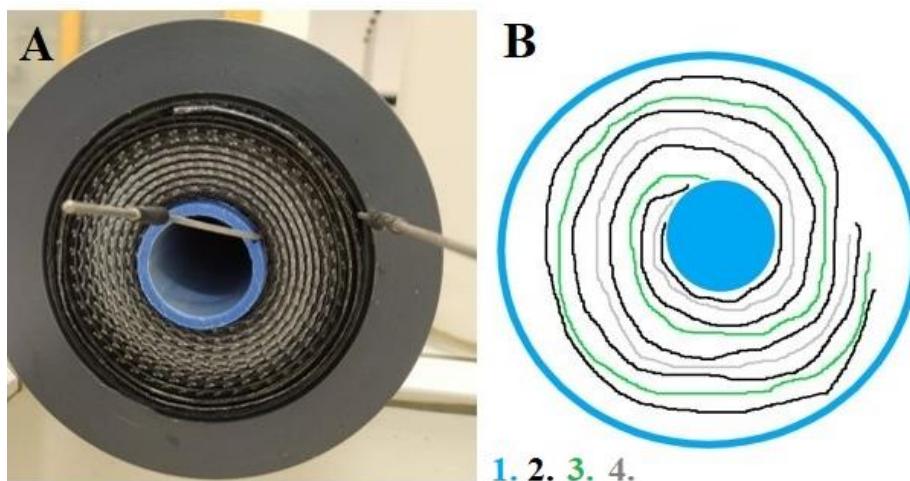
Obrázek 15: Jednotka CDI

Tabulka 1: Popis CDI jednotky

1	zdroj surové vody	6	průtokoměr	11	potrubí diluát
2	teplotní čidlo	7	vodivostní čidlo	12	potrubí koncentrát
3	sání čerpadla	8	pH sonda	13	rozvaděč
4	čerpadlo	9	elektrodotový prostor	14	dotykový displej
5	výtlaček čerpadla	10	trojcestný ventil	15	rám

4.2.2 Popis elektrody

Elektroda je spirálovitě vinutá, viz obrázek 16, aby se v malém prostoru docílilo co nejvíce aktivně využitelného měrného povrchu elektrody. Je umístěna v plášti se středovou trubicí (1). A je vyrobena ze směsi komerčního aktivního uhlí, které odpovídá vlastnostem uhlí v teoretické části. Jako pojivo pro aktivní uhlí je použit polymer polyvinylidenfluorid (PVDF). Tloušťka porézní uhlíkové vrstvy (2) je cca 200 μm . Po dvojici elektrod je izolační fólie (3). Prostor mezi elektrodami je oddělen polypropylenovou (PP) mřížkou (tzv. spacer) (4), kde proudí surová voda.



Obrázek 16: Vrchní pohled na elektrodu (A) a schematické znázornění vnutí elektrody (B)

4.2.3 Výměna elektrod

Při velké degradaci elektrod je možné starou elektrodu jednoduše vyměnit za novou. V této práci byly testovány 4 elektrody, viz obrázek 17, které zapůjčila firma ASIO, spol. s r. o., v různém časovém období. Malé elektrody jsou o objemu 2 l a velká elektroda je o objemu 10 l. Byly testovány tři malé elektrody a jedna velká elektroda. Výměna těchto elektrod probíhá následovně: nejprve se odpojí svorkovnice a hadička od staré elektrody a vypustí se z ní roztok. Ze staré elektrody jsou odšroubována obě víka a odebrána zátka středové trubice. Zátka je dána na novou středovou trubici a obě víka jsou přišroubována k nové elektrodě. Elektroda je přichycena k jednotce, připojena hadičkou do systému a na závěr se připojí svorkovnice.



Obrázek 17: Použité elektrody

4.3 Kalibrace pH a vodivostních sond

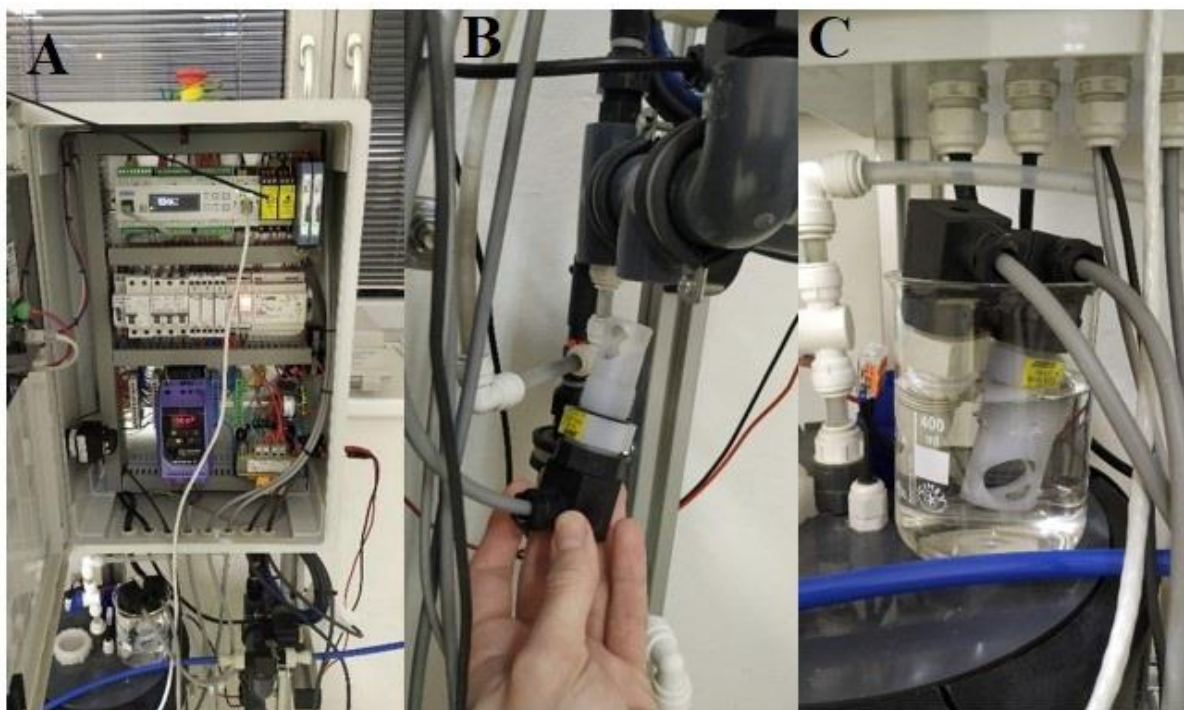
Po určitém čase vyžadují pH a vodivostní sondy kalibraci. V následujících odstavcích je popsán postup, jak probíhá kalibrace.

4.3.1 pH sondy

Kalibrace sond se provádí pomocí komerčně dostupných pufrů určených pro kalibraci. Z uzavřeného systému jednotky CDI byly demontovány pH sondy a byly připojeny ke kalibračnímu zařízení MemoLink ML1400, Knick. Sondy byly opláchnuty destilovanou vodou a vloženy do kalibračního roztoku (Pufr DURACAL pH: 4; 7; 10). Na počítači byl spuštěn program MemoSuite 2.1.0.62 a proběhla automatická kalibrace. Z kalibrace byl vytvořen záznam, který je součástí této práce v příloze 8.1.

4.3.2 Vodivostní sondy

Kalibrace sond byla provedena podle normy ČSN EN 27888 (Jakost vod – stanovení elektrické konduktivity). Byl vytvořen roztok KCl o koncentraci 0,01 mol/l. Konduktivita takového roztoku při 25 °C je 141 mS/m. K centrálnímu rozvaděči byl připojen počítač, a to speciálním kabelem kond ADAPT USB-GO (obrázek 18 A), a byl spuštěn software MV1_KONF od výrobce SMARIS s.r.o. Z uzavřeného systému jednotky CDI byly demontovány sondy (obrázek 18 B), ale zůstaly připojeny k centrálnímu rozvaděči. Sondy byly opláchnuty destilovanou vodou a vloženy do kalibračního roztoku (obrázek 18 C). Na počítači byla korigována hodnota vodivosti na 141 mS/m.



Obrázek 18: Kalibrace vodivostních sond

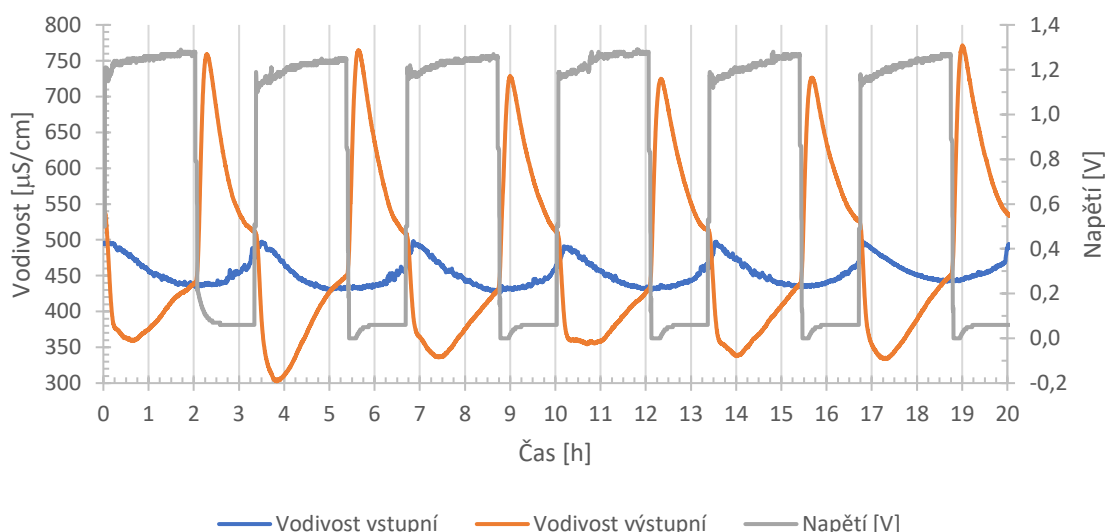
4.4 Optimalizace nastavení jednotky

Před samotným průběhem kapacitní deionizace lze na jednotce kapacitní deionizace nastavit velké množství parametrů, a to: napětí, průtok, teplotu, ostatní ionty, počáteční koncentrace a čtyři různé modely elektrod. Z technologických důvodů nebude optimalizována teplota.

- Pracovní roztok 1 byl připraven z 10,0 g chloridu sodného rozpuštěných v 42 l destilované vody. Takto připravený roztok odpovídá přibližně 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Tato hodnota byla doporučena firmou ASIO, spol. s r. o.
- Pracovní roztok 2 byl připraven z 12,5 g chloridu vápenatého rozpuštěného v 42 l destilované vody. K tomu, aby byly roztoky porovnatelné a měly přibližně 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, byla koncentrace pracovního roztoku 2 navýšena oproti pracovnímu roztoku 1.

4.4.1 Napětí

Byly testovány 3 velikosti napětí, a to: 0,9 V; 1,0 V a 1,2 V. Pouze tyto hodnoty je totiž možné nastavit na dané jednotce.



Obrázek 19: Graf závislosti vodivosti a napětí na čase, malá elektroda č. 1, 6 cyklů, při 1,2 V

Tabulka 2: Souhrnný výsledek adsorbovatelné vodivosti při různých napětích, malá elektroda č. 1, 6 cyklů

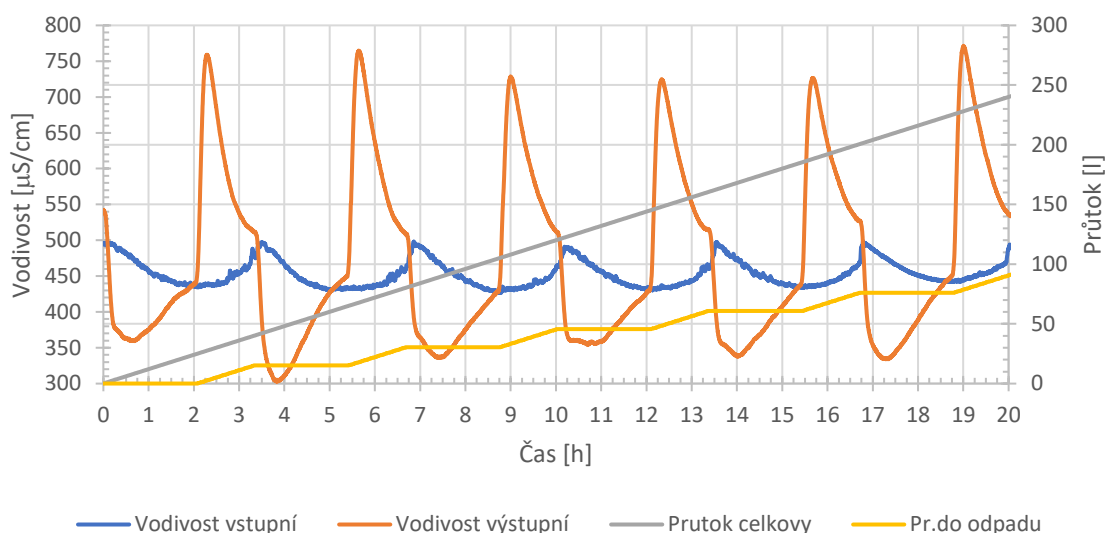
Napětí	[V]	0,9	1,0	1,2
Průměrné maximum vstupu	[$\mu\text{S}/\text{cm}$]	515	496	482
Průměrné minimum výstupu	[$\mu\text{S}/\text{cm}$]	472	427	338
Průměrné adsorbovatelné množství iontů vyjádřené ve vodivosti	[$\mu\text{S}/\text{cm}$]	43	69	144

Byly testovány tři hodnoty použitého napětí. Jako kritérium efektivity odsolování byl zvolen rozdíl mezi průměrnou vstupní a průměrnou výstupní hodnotou vodivosti při adsorpci.

Na obrázku 19 je znázorněna nejúčinnější hodnota použitého napětí. Zbylá měření jsou uvedena v příloze 8.2. V tabulce 2 jsou porovnány všechny tři hodnoty. Nejúčinnější adsorpce byla jednoznačně při napětí 1,2 V. Výsledek experimentu odpovídá poznatkům z kapitoly 2.3.2.

4.4.2 Průtok

Průtok byl testován při napětí 1,2 V u třech hodnot, a to u minimální možné nastavitelné hodnoty a posléze i u dvou větších hodnot pro ověření účinnosti. Měření bylo prováděno při průtoku: 0,2 l/min; 0,3 l/min a 0,5 l/min.



Obrázek 20: Graf závislosti vodivosti a průtoku na čase, malá elektroda č. 1, 6 cyklů, při 0,2 l/min

Tabulka 3: Souhrnný výsledek adsorbované vodivosti při různém průtoku, malá elektroda č. 1, 6 cyklů

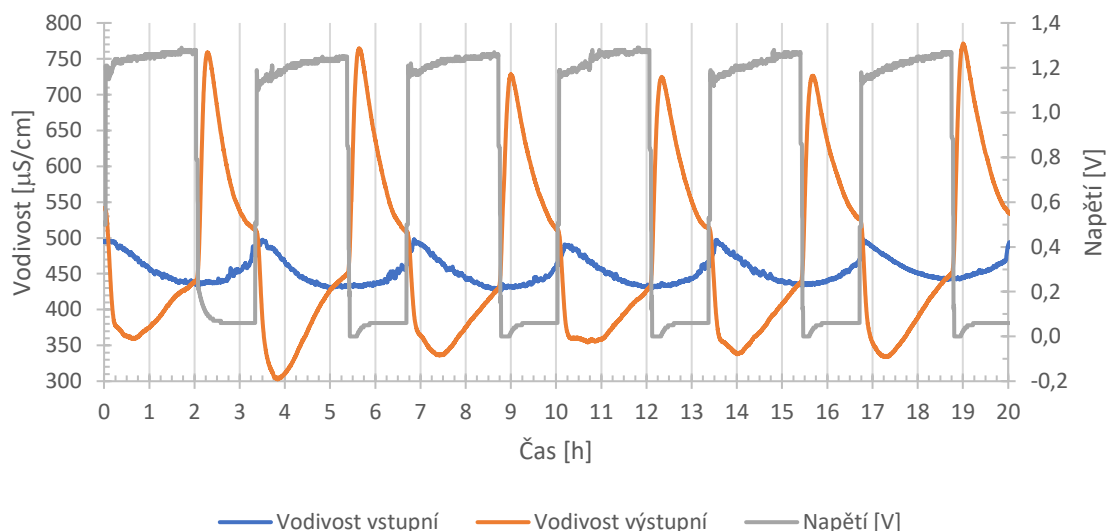
Průtok	[l/min]	0,2	0,3	0,5
Průměrné maximum vstupu	[μS/cm]	482	521	525
Průměrné minimum výstupu	[μS/cm]	338	447	496
Průměrné adsorbované množství iontů vyjádřené ve vodivosti	[μS/cm]	144	74	29
Průtok celkový	[l]	241	361	631
Průtok do odpadu	[l]	91	137	258
Procentuální podíl odpadu	[%]	37,8	38,0	40,9

Byly testovány tři hodnoty průtoku. Jako kritérium efektivity odsolování byl zvolen rozdíl mezi průměrnou vstupní a průměrnou výstupní hodnotou vodivosti při adsorpci. Dále byl zvolen procentuální podíl odpadu při daném průtoku. Na obrázku 20 je znázorněna nejúčinnější

hodnota průtoku. Zbylá měření jsou uvedena v příloze 8.3. V tabulce 3 jsou porovnány všechny tři hodnoty vodivosti a podíl odpadu. Nejúčinnější adsorpce byla jednoznačně při nejnižším průtoku (0,2 l/min). Výsledek experimentu odpovídá poznatkům z kapitoly 2.3.3.

4.4.3 Ostatní ionty

Byl testován vliv jednomocného a dvojmocného kationtu. Jako jednomocný byl zvolen Na^+ a jako dvojmocný byl zvolen Ca^{2+} , v obou případech se jednalo o chlorid. Byla testována sorpce při samotném pracovním roztoku 1 i 2, ale také ve směsi roztoku 1 a 2. Směs byla připravena o koncentraci látek 0,238 g/l v poměru 1:1 NaCl a CaCl_2 .



Obrázek 21: Graf závislosti vodivosti a napětí na čase, malá elektroda č. 1, 6 cyklů, v roztoku NaCl

Tabulka 4: Souhrnný výsledek adsorbovatelné vodivosti při různých iontech, malá elektroda č. 1, 6 cyklů

Sloučenina	[-]	NaCl	CaCl_2	Směs 1:1
Průměrné maximum vstupu	[$\mu\text{S}/\text{cm}$]	482	488	413
Průměrné minimum výstupu	[$\mu\text{S}/\text{cm}$]	338	402	299
Průměrné adsorbovatelné množství iontů vyjádřené ve vodivosti	[$\mu\text{S}/\text{cm}$]	144	85	114

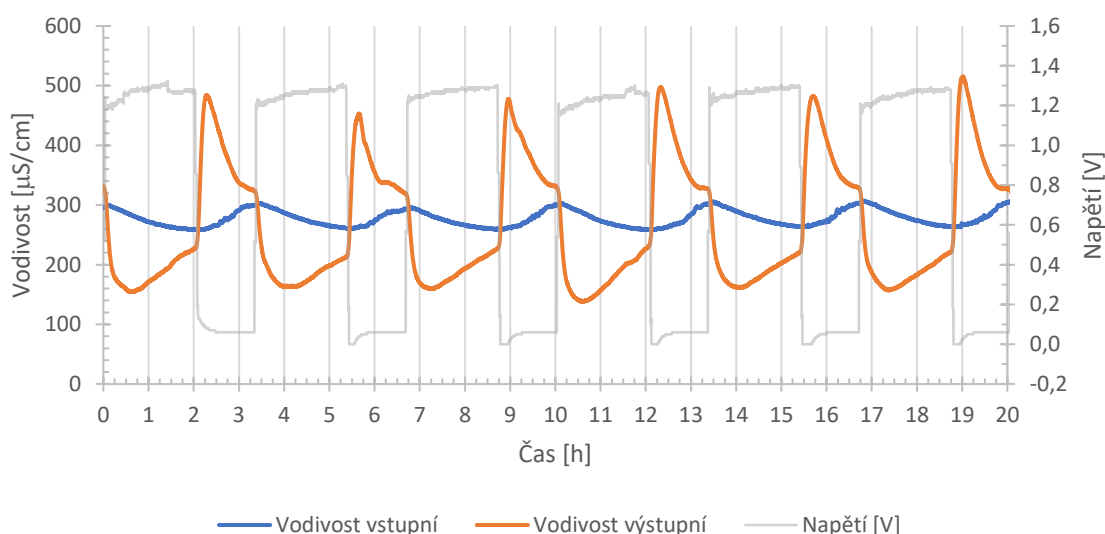
Tabulka 5: Souhrnný výsledek adsorbovatelné koncentrace iontů, malá elektroda č. 1, 6 cyklů

Kationt	[-]	Na^+	Ca^{2+}
Koncentrace před adsorpcí	[mg/l]	63	60
Koncentrace po adsorpci	[mg/l]	49	16
Adsorbovaná koncentrace	[mg/l]	14	44

Byly testovány tři skupiny látek. Jako kritérium efektivity odsolování byl zvolen rozdíl mezi průměrnou vstupní a průměrnou výstupní hodnotou vodivosti při adsorpci. V roztoku, který obsahoval směs látek, byla zkoumána individuální koncentrace iontů. Koncentrace Na^+ byla stanovena pomocí plamenového fotometru PFP7 JENWAY. Koncentrace Ca^{2+} byla stanovena pomocí titrace chelatonu 3 s indikátorem murexid. Na obrázku 21 je znázorněna látka s největším poklesem vodivosti. Zbylá měření jsou uvedena v příloze 8.4. V tabulce 4 jsou porovnány všechny tři hodnoty vodivosti. Nejúčinnější adsorpce byla v roztoku s jednomocným iontem, protože byl v roztoku jediný. Ion Na^+ má menší hydratovaný obal než Ca^{2+} , a tak byl adsorbován ve větší míře, zatímco elektrostatické síly ovlivnily adsorpci v roztoku s oběma ionty. V tabulce 5 jsou porovnány koncentrace iontů před a po adsorpci. Ve směsi je zřetelně vidět, jak jsou dvojmocné ionty upřednostňovány před adsorpcí jednomocných iontů. Tento experiment odpovídá teoretickým poznatkům z kapitoly 2.3.6.

4.4.4 Počáteční koncentrace

Byly zvoleny čtyři počáteční koncentrace. První testovaná koncentrace byla v předcházejících měřeních připravena tak, aby odpovídala přibližně $500 \mu\text{S/cm}$, tj. $0,238 \text{ g/l NaCl}$, což byla doporučená vodivost pracovního roztoku od firmy ASIIO, spol. s r. o. Následující měřená počáteční koncentrace byla dvojnásobná ($0,476 \text{ g/l NaCl}$), trojnásobná ($0,714 \text{ g/l NaCl}$) a poloviční ($0,119 \text{ g/l NaCl}$).



Obrázek 22: Graf závislosti vodivosti a napětí na čase, malá elektroda č. 1, 6 cyklů, při $0,119 \text{ g/l}$

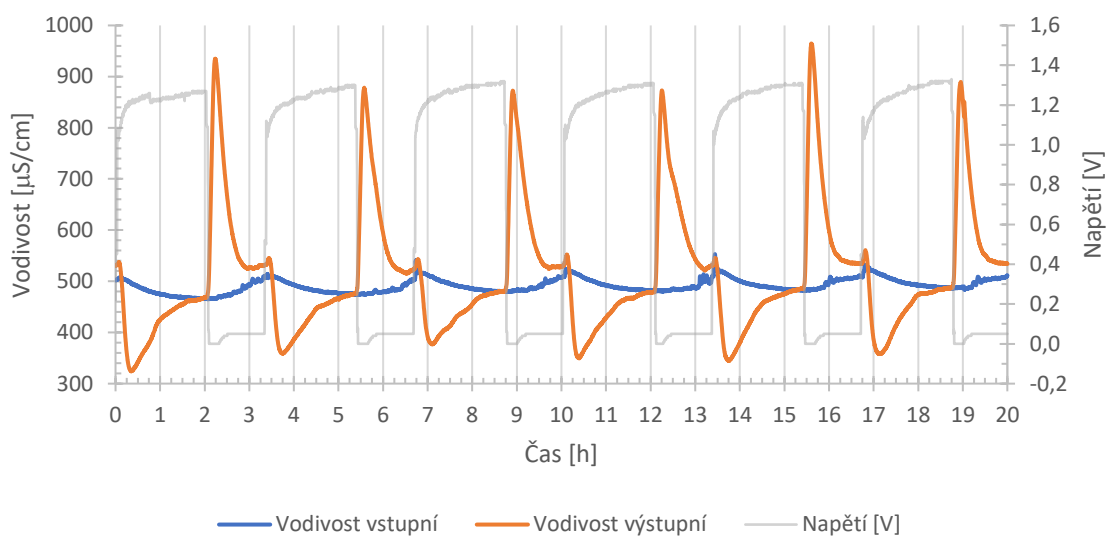
Tabulka 6: Souhrnný výsledek adsorbovatelné vodivosti při různých konc., malá elektroda č. 1, 6 cyklů

Počáteční koncentrace	[g/l]	0,119	0,238	0,476	0,714
Průměrné maximum vstupu	[$\mu\text{S/cm}$]	299	482	922	1421
Průměrné minimum výstupu	[$\mu\text{S/cm}$]	154	338	830	1373
Průměrné adsorbovatelné množství iontů vyjádřené ve vodivosti	[$\mu\text{S/cm}$]	145	144	92	48

Byly testovány čtyři hodnoty počáteční koncentrace. Jako kritérium efektivity odsolování byl zvolen rozdíl mezi průměrnou vstupní a průměrnou výstupní hodnotou vodivosti při adsorpci. Na obrázku 22 je znázorněna nejúčinnější hodnota počáteční koncentrace. Zbylá měření jsou uvedena v příloze 8.5. V Tabulka 6 jsou porovnány všechny čtyři hodnoty vodivosti. Nejúčinnější adsorpce byla při koncentraci 0,119 g/l, ale byla téměř totožná s koncentrací 0,238 g/l (přibližně 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Při takto nízkých koncentracích již není velký rozdíl v adsorbovatelném množství. Výsledek experimentu odpovídá poznatkům z kapitoly 2.3.7.

4.4.5 Elektroda

K dispozici byly celkem 4 elektrody (viz kapitola 4.2.3) a každá jinak opotřebovaná. Na jedné byla provedena optimalizace a u následujících tří byla změřena jejich účinnost odsolování.



Obrázek 23: Graf závislosti vodivosti a napětí na čase, malá elektroda č. 3, 6 cyklů

Tabulka 7: Souhrnný výsledek adsorbovatelné vodivosti různých elektrod, 6 cyklů

Elektroda	[-]	1	2	3	4
Průměrné maximum vstupu	[$\mu\text{S}/\text{cm}$]	482	500	501	476
Průměrné minimum výstupu	[$\mu\text{S}/\text{cm}$]	338	387	353	446
Průměrné adsorbovatelné množství iontů vyjádřené ve vodivosti	[$\mu\text{S}/\text{cm}$]	144	113	148	31

Byly testovány čtyři elektrody. Jako kritérium efektivity odsolování byl zvolen rozdíl mezi průměrnou vstupní a průměrnou výstupní hodnotou vodivosti při adsorpci. Na obrázku 23 je znázorněna nejúčinnější elektroda. Z naměřených dat vyplývá, že elektroda č. 4 je již značně zkorodovaná a není schopná adsorpce. Zbylá měření jsou uvedena v příloze 8.6. V Tabulka 7 jsou porovnány všechny čtyři elektrody. Nejúčinnější adsorpce proběhla na elektrodě č. 3.

4.5 Úloha do praktické výuky technologie vody

V rámci umístění CDI jednotky v laboratoři technologie vody je vypracována úloha do praktik. Principem úlohy je seznámit studenty s metodou kapacitní deionizace a praktické vyzkoušení odsolení modelové vody.

Úloha kapacitní deionizace

1. Princip: viz kapitola 2.2
2. Úkoly:
 - Příprava 7l pracovního roztoku NaCl o koncentraci 0,2 g/l.
 - Odsolení pracovního roztoku a stažení a zpracování dat.
3. Chemikálie: NaCl a destilovaná voda
4. Pomůcky: poloprovodní jednotka CDI, analytické váhy, kádinka, PC
5. Nastavení přístroje:
 - Zapnutí přístroje na levé straně.
 - V kartě *Měřené veličiny* vyresetovat počítadlo průtoku. Poté v kartě *Nastavení* dvakrát odkliknout červené tlačítko reset a nastavit doby provozu a průtoky:

Tabulka 8: Nastavení doby provozu a průtoky

Činnost	Doba provozu [h:m:s]	Požadovaný průtok [l/min]
Zvýšení 0,5 V	00:02:00	0,2
Doba provozu	00:30:00	0,2
Snížení 0,5 V	00:02:00	0,2
Doba nula	00:00:30	0,2
Snížení na -0,5 V	00:01:00	0,2
Reverzace	00:00:00	0,2
Zvýšení na -0,5 V	00:00:00	0,2
Doba nula	00:20:00	0,2

- Zapnout jednotku.
 - Po dokončení cyklu zastavit provoz a uložit data, v kartě *Nastavení* kliknout na tlačítko uložit. Stáhnout data do PC.
6. Pracovní postup:

Připravte pracovní roztok tak, že do zásobní nádrže vlijete 5 l destilované vody (2 l jsou v elektrodovém prostoru) a navažte NaCl. Nejprve nechte roztok cirkulovat bez napětí po dobu 20 min. Kapacitní deionizace se nastaví podle odstavce 5 nastavení přístroje. Diluát a koncentrát je jímán do společné nádoby.
 7. Protokol bude obsahovat:
 - Úvod – vlastními slovy popsáno, kde se s danou technologií setkáváme.
 - Teorii kapacitní deionizace.
 - Schéma kapacitní deionizační jednotky.
 - Postup – slovní popis vlastního měření v trpném rodě a minulém čase.
 - Grafické vyhodnocení dat vodivosti a napětí na čase G , $U=f(\tau)$ a vodivosti a průtoku na čase G , $Q=f(\tau)$.
 - Závěr – zhodnocení průběhu měření a dosažených výsledků.

5 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se věnovala provozu a optimalizaci poloprovozní kapacitní deionizační jednotky, která byla zapůjčena od firmy ASIO, spol. s r. o. V teoretické části jsou stručně shrnuty základní zákonitosti deionizace, faktory ovlivňující funkci kapacitní deionizace, konfigurace modelů kapacitní deionizace a koroze elektrod. Dále zde bylo popsáno praktické využití této metody a její možný následný výzkum. V experimentální části bylo cílem seznámit se s jednotkou, popsat postupy kalibrace, údržby a nalézt optimální provozní podmínky jednotky dle poznatků z teoretické části.

V práci byla podrobně popsána kapacitní deionizační jednotka. K dispozici byly celkem čtyři elektrody, každá v jiném stáří. Byl popsán průběh jejich výměny. Během měření této bakalářské práce probíhalo rovněž měření jedné diplomové práce, kde byla k dispozici elektroda č. 2. Vlastnosti elektrody byly změřeny před zahájením měření zmiňované diplomové práce a po jejím dokončení. Zajímavým zjištěním bylo, že během používání elektrody se snížila schopnost odsolovat roztok o $30 \mu\text{S}/\text{cm}$. Což ukazuje, jak rychle elektrody korodují vlivem zavádění potenciálu na elektrody. Byla provedena kalibrace pH a vodivostních sond a postup byl krok po kroku zapsán.

Jako pracovní roztoky byly zvoleny roztok NaCl o koncentraci 0,119 g/l; 0,238 g/l; 0,476 g/l a roztok CaCl₂ o koncentraci 0,238 g/l. Kationty Na⁺ a Ca²⁺ byly zvoleny jako základní ionty obsažené ve vodách. Rovněž aniont Cl⁻ byl zvolen jako velice častý iont tvořící sůl. Při experimentech s napětím, průtokem a elektrodami byl využíván pouze roztok NaCl o koncentraci 0,238 g/l. Koncentrace 0,119 g/l, 0,476 g/l a 0,714g/l NaCl byly použity při měření vlivu počáteční koncentrace. Roztok CaCl₂ o koncentraci 0,238 g/l byl použit při zkoumání vlivu ostatních iontů v roztoku. Roztok CaCl₂ byl změřen samostatně, ale i ve směsi s NaCl, a to 1:1. Optimálním nastavením je napětí 1,2 V, průtok 0,2 l/min. Z hlediska moci iontů probíhala nejučinnější adsorpce v roztoku s jednomocným iontem. Při experimentech, kdy byly ionty testovány samostatně, má iont Na⁺ menší hydratovaný obal než Ca²⁺, a tak byl adsorbován ve větší míře. Zatímco ve směsi převládaly elektrostatické síly, bylo zřetelně vidět, jak jsou dvojmocné ionty upřednostňovány před adsorpcí jednomocných iontů. Z dostupných výsledků elektrod nejlépe vycházela malá elektroda č. 3. Následně byla z optimalizovaných podmínek vytvořena úloha do praktické výuky technologie vody.

Kapacitní deionizace je velmi zajímavou metodou, která má velký potenciál využití na místech s nedostatkem energie. V porovnání s ostatními separačními metodami má CDI několik výhod: není nutné dávkovat chemikálie, produkuje malé množství odpadu, je nenáročná na provoz při laboratorních podmínkách (p, T). Rovněž vykazuje slibné využití v kombinaci s reverzní osmózou. Lze očekávat, že výzkum se bude mimo jiné v budoucnu také věnovat novým materiálům elektrod a inovovaným konfiguračním modelům.

6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PORADA, S., R. ZHAO, A. VAN DER WAL, V. PRESSER a P. M. BIESHEUVEL. *Review on the science and technology of water desalination by capacitive deionization* [online]. B.m.: Elsevier Ltd. 1. říjen 2013. ISSN 0079-6425. Dostupné z: doi:10.1016/j.pmatsci.2013.03.005
- [2] ANDERSON, Marc A., Ana L. CUDERO a Jesus PALMA. *Capacitive deionization as an electrochemical means of saving energy and delivering clean water. Comparison to present desalination practices: Will it compete?* [online]. 30. duben 2010. ISSN 0013-4686. Dostupné z: doi:10.1016/j.electacta.2010.02.012
- [3] ALMARZOOQI, Faisal A., Amal A. AL GHAFERI, Irfan SAADAT a Nidal HILAL. *Application of Capacitive Deionisation in water desalination: A review* [online]. B.m.: Elsevier. 2. červen 2014. ISSN 0011-9164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2014.02.031
- [4] ZHANG, Changyong, Di HE, Jinxing MA, Wangwang TANG a T. David WAITE. *Faradaic reactions in capacitive deionization (CDI) - problems and possibilities: A review* [online]. B.m.: Elsevier Ltd. 1. leden 2018. ISSN 1879-2448. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2017.10.024
- [5] CHOI, Jongmoon, Pema DORJI, Ho Kyong SHON a Seungkwon HONG. *Applications of capacitive deionization: Desalination, softening, selective removal, and energy efficiency* [online]. B.m.: Elsevier B.V. 1. leden 2019. ISSN 0011-9164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2018.10.013
- [6] KLIKORKA, Jiří, Bohumil HÁJEK a Jiří VOTINSKÝ. *Obecná a anorganická chemie*. 2. nezměn. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989.
- [7] MCMURRY, John. *Organická chemie*. 1 ed. V Brně: VUTIUM, 2007. ISBN 978-80-214-3291-8.
- [8] PITTER, Pavel. *HYDROCHEMIE*. 5. aktuali. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2015. ISBN 978-80-7080-928-0.
- [9] DION, Leon. Apparatus for treating liquids. US820482A. 24. květen 1904. Spojené státy.
- [10] BLAIR, JOHN W. a GEORGE W. MURPHY. Electrochemical Demineralization of Water with Porous Electrodes of Large Surface Area. In: [online]. 1960 [vid. 2020-11-05], s. 206–223. Dostupné z: doi:10.1021/ba-1960-0027.ch020
- [11] MURPHY, G. W. a J. H. TUCKER. The demineralization behavior of carbon and chemically-modified carbon electrodes. *Desalination* [online]. 1966, **1**(3), 247–259. ISSN 0011-9164. Dostupné z: doi:10.1016/S0011-9164(00)80256-8
- [12] KIM, Nayeong, Jiho LEE, Seonghwan KIM, Sung Pil HONG, Changha LEE, Jeyong YOON a Choonsoo KIM. *Short review of multichannel membrane capacitive deionization: Principle, current status, and future prospect* [online]. B.m.: MDPI AG. 18. leden 2020 [vid. 2020-10-30]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app10020683

- [13] BIESHEUVEL, P. M., Yeqing FU a Martin Z. BAZANT. Diffuse charge and Faradaic reactions in porous electrodes. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics* [online]. 2011, **83**(6). ISSN 1539-3755. Dostupné z: doi:10.1103/PhysRevE.83.061507
- [14] ZHAO, R., P. M. BIESHEUVEL, H. MIEDEMA, H. BRUNING a A. VAN DER WAL. Charge efficiency: A functional tool to probe the double-layer structure inside of porous electrodes and application in the modeling of capacitive deionization. *Journal of Physical Chemistry Letters* [online]. 2010, **1**(1), 205–210. ISSN 1948-7185. Dostupné z: doi:10.1021/jz900154h
- [15] OLADUNNI, Jimoh, Jerina H. ZAIN, Abdul HAI, Fawzi BANAT, G. BHARATH a Emad ALHSEINAT. *A comprehensive review on recently developed carbon based nanocomposites for capacitive deionization: From theory to practice* [online]. B.m.: Elsevier B.V. 22. prosinec 2018. ISSN 1873-3794. Dostupné z: doi:10.1016/j.seppur.2018.06.046
- [16] CHENG, Yutuo, Zhiqi HAO, Changrun HAO, Yu DENG, Xingying LI, Kexun LI a Yubo ZHAO. A review of modification of carbon electrode material in capacitive deionization. *RSC Advances* [online]. 2019, **9**(42), 24401–24419 [vid. 2020-10-30]. ISSN 2046-2069. Dostupné z: doi:10.1039/c9ra04426d
- [17] ZAID, Khayri a A B SURIANI. A review on electrode materials used in capacitive deionization processes for water treatment applications. *Sci. Int. (Lahore, Pak.)* [online]. 2017, **29**(2), 285–289 [vid. 2020-10-30]. ISSN 1013-5316. Dostupné z: <http://www.sci-int.com/Search?catid=85>
- [18] NOVÁK, Josef. *Fyzikální chemie bakalářský a magisterský kurz VŠCHT PRAHA* [online]. 2016 [vid. 2020-11-05]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/fch/cz/pomucky/FCH4Mgr.view.pdf>
- [19] BIESHEUVEL, P M a J E DYKSTRA. *Introduction to Physics of Electrochemical Processes V e-water ion j ion i* [online]. 2020 [vid. 2021-03-19]. ISBN 9789090341064. Dostupné z: <http://www.physicsofelectrochemicalprocesses.com>
- [20] BIESHEUVEL, P M, S PORADA a J E DYKSTRA. *The difference between Faradaic and non-Faradaic electrode processes*. 2021.
- [21] GAMAETHIRALALAGE, J G, K SINGH, S SAHIN, J YOON, M ELIMELECH, M E SUSS, P LIANG, P M BIESHEUVEL, R L ZORNITTA a L C P M DE SMET. Recent advances in ion selectivity with capacitive deionization. *Energy & Environmental Science* [online]. 2020. Dostupné z: doi:10.1039/d0ee03145c
- [22] SUSS, M. E., S. PORADA, X. SUN, P. M. BIESHEUVEL, J. YOON a V. PRESSER. *Water desalination via capacitive deionization: What is it and what can we expect from it?* [online]. B.m.: Royal Society of Chemistry. 2015. ISSN 1754-5706. Dostupné z: doi:10.1039/c5ee00519a
- [23] VESELÝ, Martin, Zdeněk HRDLIČKA, Jiří HANIKA a Jaromír LUBOJACKÝ. PROCEEDINGS of the 5th International Conference on Chemical Technology. In: *International Conference on Chemical Technology* [online]. Prague: Czech Society of Industrial Chemistry, 2017, s. 572 [vid. 2020-10-30]. ISBN 978-80-86238-65-4. Dostupné z: https://www.icct.cz/AngiologyKlon-ICCT/media/system/ICCT2017-full_papers.pdf

- [24] VOSKIAN, Sahag a T. Alan HATTON. Faradaic electro-swing reactive adsorption for CO₂ capture. *Energy and Environmental Science* [online]. 2019, **12**(12), 3530–3547 [vid. 2021-05-26]. ISSN 1754-5706. Dostupné z: doi:10.1039/c9ee02412c
- [25] GUYES, Eric N., Amit N. SHOCRON, Yinke CHEN, Charles E. DIESENDRUCK a Matthew E. SUSS. Long-lasting, monovalent-selective capacitive deionization electrodes. *npj Clean Water* [online]. 2021, **4**(1), 1–11 [vid. 2021-05-27]. ISSN 2059-7037. Dostupné z: doi:10.1038/s41545-021-00109-2
- [26] TSAI, Shao Wei, Lukas HACKL, Arkadeep KUMAR a Chia Hung HOU. Exploring the electrosorption selectivity of nitrate over chloride in capacitive deionization (CDI) and membrane capacitive deionization (MCDI). *Desalination* [online]. 2021, **497**, 114764. ISSN 0011-9164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2020.114764
- [27] SHEN, Yu Yi, Shan Wen WU a Chia Hung HOU. Exploring the electrosorption selectivity and recovery of indium ions with capacitive deionization in acidic solution. *Journal of Colloid and Interface Science* [online]. 2021, **586**, 819–829. ISSN 1095-7103. Dostupné z: doi:10.1016/j.jcis.2020.11.006
- [28] KIM, Kwiyong, Stephen COTTY, Johannes ELBERT, Raylin CHEN, Chia Hung HOU a Xiao SU. Asymmetric Redox-Polymer Interfaces for Electrochemical Reactive Separations: Synergistic Capture and Conversion of Arsenic. *Advanced Materials* [online]. 2020, **32**(6), 1906877 [vid. 2021-05-27]. ISSN 1521-4095. Dostupné z: doi:10.1002/adma.201906877
- [29] KIM, Kwiyong, Paola BALDAGUEZ MEDINA, Johannes ELBERT, Emmanuel KAYIWA, Roland D. CUSICK, Yujie MEN a Xiao SU. Molecular Tuning of Redox-Copolymers for Selective Electrochemical Remediation. *Advanced Functional Materials* [online]. 2020, **30**(52), 2004635 [vid. 2021-05-27]. ISSN 1616-3028. Dostupné z: doi:10.1002/adfm.202004635
- [30] HAWKS, Steven A., Maira R. CERÓN, Diego I. OYARZUN, Tuan Anh PHAM, Cheng ZHAN, Colin K. LOEB, Daniel MEW, Amanda DEINHART, Brandon C. WOOD, Juan G. SANTIAGO, Michael STADERMANN a Patrick G. CAMPBELL. Using Ultramicroporous Carbon for the Selective Removal of Nitrate with Capacitive Deionization. *Environmental Science and Technology* [online]. 2019, **53**(18), 10863–10870 [vid. 2021-05-27]. ISSN 1520-5851. Dostupné z: doi:10.1021/acs.est.9b01374
- [31] CERÓN, Maira R., Fikret AYDIN, Steven A. HAWKS, Diego I. OYARZUN, Colin K. LOEB, Amanda DEINHART, Cheng ZHAN, Tuan Anh PHAM, Michael STADERMANN a Patrick G. CAMPBELL. Cation Selectivity in Capacitive Deionization: Elucidating the Role of Pore Size, Electrode Potential, and Ion Dehydration. *ACS Applied Materials and Interfaces* [online]. 2020, **12**(38), 42644–42652 [vid. 2021-05-27]. ISSN 1944-8252. Dostupné z: doi:10.1021/acsami.0c07903
- [32] MOSSAD, Mohamed a Linda ZOU. A study of the capacitive deionisation performance under various operational conditions. *Journal of Hazardous Materials* [online]. 2012, **213–214**, 491–497. ISSN 0304-3894. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhazmat.2012.02.036
- [33] LI, Haibo, Likun PAN, Yanping ZHANG, Linda ZOU, Changqing SUN, Yankun ZHAN a Zhuo SUN. Kinetics and thermodynamics study for electrosorption of NaCl onto carbon nanotubes and carbon nanofibers electrodes. *Chemical Physics Letters* [online]. 2010, **485**(1–3), 161–166. ISSN 0009-2614. Dostupné z: doi:10.1016/j.cplett.2009.12.031

- [34] ZHAO, Xiaoyu, Hongxin WEI, Huachao ZHAO, Yanfei WANG a Na TANG. *Electrode materials for capacitive deionization: A review* [online]. B.m.: Elsevier B.V. 15. září 2020. ISSN 1572-6657. Dostupné z: doi:10.1016/j.jelechem.2020.114416
- [35] HOU, Chia Hung a Cheng Ye HUANG. A comparative study of electrosorption selectivity of ions by activated carbon electrodes in capacitive deionization. *Desalination* [online]. 2013, **314**, 124–129. ISSN 0011-9164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2012.12.029
- [36] LI, Haibo, Likun PAN, Chunyang NIE, Yong LIU a Zhuo SUN. Reduced graphene oxide and activated carbon composites for capacitive deionization. *Journal of Materials Chemistry* [online]. 2012, **22**(31), 15556–15561 [vid. 2020-10-30]. ISSN 0959-9428. Dostupné z: doi:10.1039/c2jm32207b
- [37] CHEN, P. A., H. C. CHENG a H. Paul WANG. Activated carbon recycled from bitter-tea and palm shell wastes for capacitive desalination of salt water. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2018, **174**, 927–932. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2017.11.034
- [38] PORADA, S., L. BORCHARDT, M. OSCHATZ, M. BRYJAK, J. S. ATCHISON, K. J. KEESMAN, S. KASKEL, P. M. BIESHEUVEL a V. PRESSER. Direct prediction of the desalination performance of porous carbon electrodes for capacitive deionization. *Energy and Environmental Science* [online]. 2013, **6**(12), 3700–3712 [vid. 2021-01-20]. ISSN 1754-5692. Dostupné z: doi:10.1039/c3ee42209g
- [39] HUANG, Zheng Hong, Zhiyu YANG, Feiyu KANG a Michio INAGAKI. *Carbon electrodes for capacitive deionization* [online]. B.m.: Royal Society of Chemistry. 3. leden 2017 [vid. 2021-03-13]. ISSN 2050-7496. Dostupné z: doi:10.1039/c6ta06733f
- [40] LI, Haibo, Linda ZOU, Likun PAN a Zhuo SUN. Novel graphene-like electrodes for capacitive deionization. *Environmental Science and Technology* [online]. 2010, **44**(22), 8692–8697. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/es101888j
- [41] WANG, Jian, Jinhong DAI, Zhuosheng JIANG, Benli CHU a Fuming CHEN. *Recent progress and prospect of flow-electrode electrochemical desalination system* [online]. B.m.: Elsevier B.V. 15. květen 2021. ISSN 0011-9164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2021.114964
- [42] SHEN, Yu-Yi, Chung-Chun HSU, Shao-Wei TSAI a Chia-Hung HOU. Enhanced electrosorption selectivity of phosphate using an anion-exchange resin-coated activated carbon electrode. *Journal of Colloid and Interface Science* [online]. 2021, **600**, 199–208. ISSN 0021-9797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jcis.2021.04.129
- [43] TKOTZ, Klaus. *Příručka pro elektrotechniku*. 2. dopl. v. Praha: Europa-Sobotáles, 2006. ISBN 80-86706-13-3.
- [44] LU, Ding, Wangfeng CAI a Yan WANG. Optimization of the voltage window for long-term capacitive deionization stability. *Desalination* [online]. 2017, **424**, 53–61. ISSN 0011-9164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2017.09.026
- [45] LI, Haibo, Yang GAO, Likun PAN, Yanping ZHANG, Yiwei CHEN a Zhuo SUN. Electrosorptive desalination by carbon nanotubes and nanofibres electrodes and ion-exchange membranes. *Water Research* [online]. 2008, **42**(20), 4923–4928. ISSN 0043-1354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2008.09.026

- [46] HOLUBOWITCH, Nicolas, Ayokunle OMOSEBI, Xin GAO, James LANDON a Kunlei LIU. Quasi-Steady-State Polarization Reveals the Interplay of Capacitive and Faradaic Processes in Capacitive Deionization. *ChemElectroChem* [online]. 2017, **4**(9), 2404–2413. ISSN 2196-0216. Dostupné z: doi:10.1002/celec.201700082
- [47] NOVÁK JAN. *Adsorpce a desorpce u aktivního uhlí v závislosti na teplotě*. B.m., 2019. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. [online]. 2019, dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/153936/Novak_Jan_Diplomova_prace.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [48] DYKSTRA, J. E., K. J. KEESMAN, P. M. BIESHEUVEL a A. VAN DER WAL. Theory of pH changes in water desalination by capacitive deionization. *Water Research* [online]. 2017, **119**, 178–186. ISSN 1879-2448. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2017.04.039
- [49] LANDON, James, Xin GAO, Ayokunle OMOSEBI a Kunlei LIU. Emerging investigator series: Local pH effects on carbon oxidation in capacitive deionization architectures. *Environmental Science: Water Research and Technology* [online]. 2021, **7**(5), 861–869 [vid. 2021-05-27]. ISSN 2053-1419. Dostupné z: doi:10.1039/d1ew00005e
- [50] YU, Jihyun, Kyusik JO, Taeyoung KIM, Jiho LEE a Jeyong YOON. Temporal and spatial distribution of pH in flow-mode capacitive deionization and membrane capacitive deionization. *Desalination* [online]. 2018, **439**, 188–195. ISSN 0011-9164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2018.04.011
- [51] TANG, Wangwang, Jie LIANG, Di HE, Jilai GONG, Lin TANG, Zhifeng LIU, Dongbo WANG a Guangming ZENG. Various cell architectures of capacitive deionization: Recent advances and future trends. *Water Research* [online]. 2019, **150**, 225–251 [vid. 2020-11-02]. ISSN 0043-1354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2018.11.064
- [52] HASSANVAND, Armineh, George Q. CHEN, Paul A. WEBLEY a Sandra E. KENTISH. A comparison of multicomponent electrosorption in capacitive deionization and membrane capacitive deionization. *Water Research* [online]. 2018, **131**, 100–109. ISSN 1879-2448. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2017.12.015
- [53] TANG, Wangwang, Di HE, Changyong ZHANG, Peter KOVALSKY a T. David WAITE. Comparison of Faradaic reactions in capacitive deionization (CDI) and membrane capacitive deionization (MCDI) water treatment processes. *Water Research* [online]. 2017, **120**, 229–237 [vid. 2021-05-29]. ISSN 1879-2448. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2017.05.009
- [54] ZHANG, Changyong, Lei WU, Jinxing MA, A. Ninh PHAM, Min WANG a T. David WAITE. Integrated Flow-Electrode Capacitive Deionization and Microfiltration System for Continuous and Energy-Efficient Brackish Water Desalination. *Environmental Science and Technology* [online]. 2019, **53**(22), 13364–13373 [vid. 2021-05-29]. ISSN 1520-5851. Dostupné z: doi:10.1021/acs.est.9b04436
- [55] ZHANG, Changyong, Lei WU, Jinxing MA, Min WANG, Jingyi SUN a T. David WAITE. Evaluation of long-term performance of a continuously operated flow-electrode CDI system for salt removal from brackish waters. *Water Research* [online]. 2020, **173**, 115580. ISSN 1879-2448. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2020.115580

- [56] ZHANG, Changyong, Min WANG, Wei XIAO, Jinxing MA, Jingyi SUN, Hengliang MO a T. David WAITE. Phosphate selective recovery by magnetic iron oxide impregnated carbon flow-electrode capacitive deionization (FCDI). *Water Research* [online]. 2021, **189**, 116653. ISSN 1879-2448. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2020.116653
- [57] COHEN, Izaak, Eran AVRAHAM, Yaniv BOUHADANA, Abraham SOFFER a Doron AURBACH. Long term stability of capacitive de-ionization processes for water desalination: The challenge of positive electrodes corrosion. *Electrochimica Acta* [online]. 2013, **106**, 91–100. ISSN 0013-4686. Dostupné z: doi:10.1016/j.electacta.2013.05.029
- [58] UWAYID, Rana, Nicola M. SERAPHIM, Eric N. GUYES, David EISENBERG a Matthew E. SUSS. Characterizing and mitigating the degradation of oxidized cathodes during capacitive deionization cycling. *Carbon* [online]. 2021, **173**, 1105–1114. ISSN 0008-6223. Dostupné z: doi:10.1016/j.carbon.2020.11.045
- [59] XING, Wenle, Jie LIANG, Wangwang TANG, Di HE, Ming YAN, Xiangxi WANG, Yuan LUO, Ning TANG a Mei HUANG. *Versatile applications of capacitive deionization (CDI)-based technologies* [online]. B.m.: Elsevier B.V. 15. květen 2020. ISSN 0011-9164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2020.114390
- [60] TAN, Cheng, Calvin HE, Wangwang TANG, Peter KOVALSKY, John FLETCHER a T. David WAITE. Integration of photovoltaic energy supply with membrane capacitive deionization (MCDI) for salt removal from brackish waters. *Water Research* [online]. 2018, **147**, 276–286. ISSN 1879-2448. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2018.09.056

7 SEZNAM ZKRATEK

CDI	Kapacitní deionizace	Capacitive deionization
ED	Elektrodová dvojrstva	Electrode double layer
GCS	Gouy-Chapman-Stern	Gouy-Chapman-Stern
AC	Aktivní uhlí	Activated carbon
PVDF	Polyvinyliden difluorid	Polyvinylidene difluoride
CA	Uhlíkový aerogel	Carbon airgel
GE	Grafen	Grafen
CNT	Uhlíkové nanotrubičky	Carbon nanotubes
CNF	Uhlíkové nanovlákná	Carbon nanofibers
MCDI	Membránová kapacitní deionizace	Membrane capacitive deionization
SHE	Standartní vodíková elektroda	Standard hydrogen electrode
TDS	Celkové rozpuštěné pevné látky	Total dissolved solids
i-CDI	Inverzní kapacitní deionizace	Inverse capacitive deionization
FCDI	Průtoková kapacitní deionizace	Flow capacitive deionization
HCDI	Hybridní kapacitní deionizace	Hybrid capacitive deionization
CID	Kationtová interakce odsolování	Cationic interaction of desalination
RO	Reverzní osmózy	Reverse osmosis
PP	Polypropylen	Polypropylene

8 PŘÍLOHY

8.1 Kalibrační záznamy

John Q. Public Inc.

John Q. Public Inc.

P.O. Box 123
Anytown, AL 12345
USA
Phone: +1 123 45678-0
Fax: +1 123 45678-200
Email: john.q@public.com
Internet: www.publiciq.com

Calibration Report

Sensor (calibration item): pH (glass)
Manufacturer: Knick
Type: SE554X/1-NMSN
Serial no.: 0270424

Date of initial use: 11/28/2016 7:49 PM
Date of calibration: 6/10/2021 1:51 PM
Calibration mode: Calimatic
Number of measuring points: 3
Test system: MemoSuite 2.1.0.62

Calibration standards: Buffer Hach 4.01 (25 °C)
Buffer Hach 7.00 (25 °C)
Buffer Hach 10.00 (25 °C)

Measuring point	Nominal buffer value [pH]	Desired value [pH]	Actual value [pH]	Temperature [°C]	Electrode voltage [mV]	Settle time [s]
1	4.01	4.01	4.02	23.7	179.2	16
2	7.00	7.00	7.07	23.8	5.9	26
3	10.00	10.01	10.23	23.8	-173.4	22

Zero point: 7.07 pH
Slope: 59.0 mV/pH

Calibration result: Pass Adjustment performed: ¹⁾ Yes

1) After an adjustment the values for zero and slope are stored in the sensor.

Operator

MemoSuite BasicUser (basic)

John Q. Public Inc.

John Q. Public Inc.
P.O. Box 123
Anytown, AL 12345
USA
Phone: +1 123 45678-0
Fax: +1 123 45678-200
Email: john.q@public.com
Internet: www.publicjq.com

Calibration Report

Sensor (calibration item):	pH (glass)
Manufacturer:	Knick
Type:	SE515/1-MS
Serial no.:	8320310
Date of initial use:	7/3/2019 9:31 AM
Date of calibration:	6/9/2021 12:45 PM
Calibration mode:	Calimatic
Number of measuring points:	3
Test system:	MemoSuite 2.1.0.62
Calibration standards:	Buffer Hach 4.01 (25 °C) Buffer Hach 7.00 (25 °C) Buffer Hach 10.00 (25 °C)

Measuring point	Nominal buffer value [pH]	Desired value [pH]	Actual value [pH]	Temperature [°C]	Electrode voltage [mV]	Settle time [s]
1	4.01	4.02	3.98	32.6	168.3	94
2	7.00	6.98	6.96	31.3	-4.2	25
3	10.00	9.95	9.85	31.0	-170.2	28

Zero point:	6.94 pH
Slope:	55.8 mV/pH

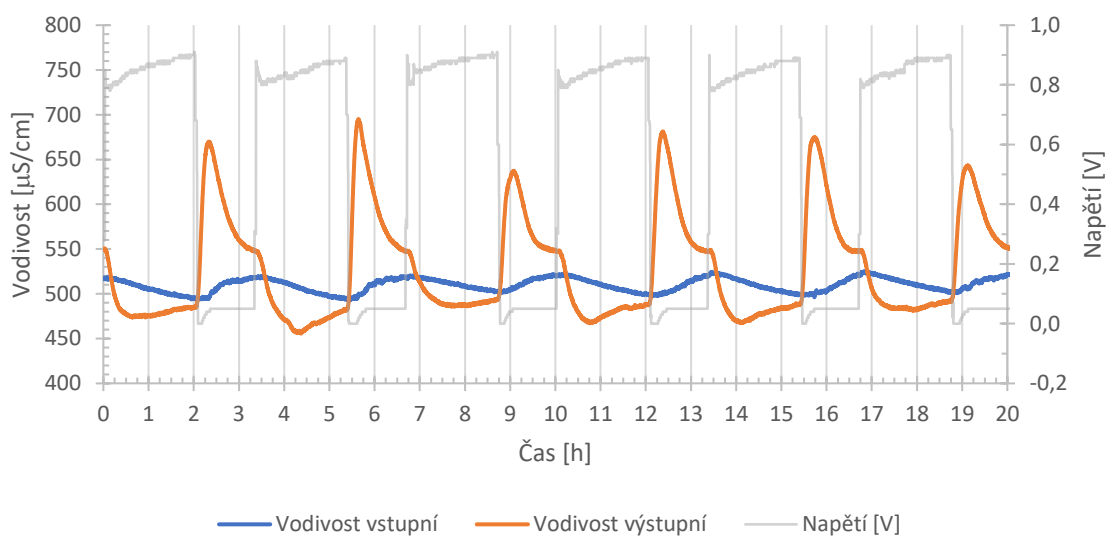
Calibration result: Pass Adjustment performed: ¹⁾ Yes

1) After an adjustment the values for zero and slope are stored in the sensor.

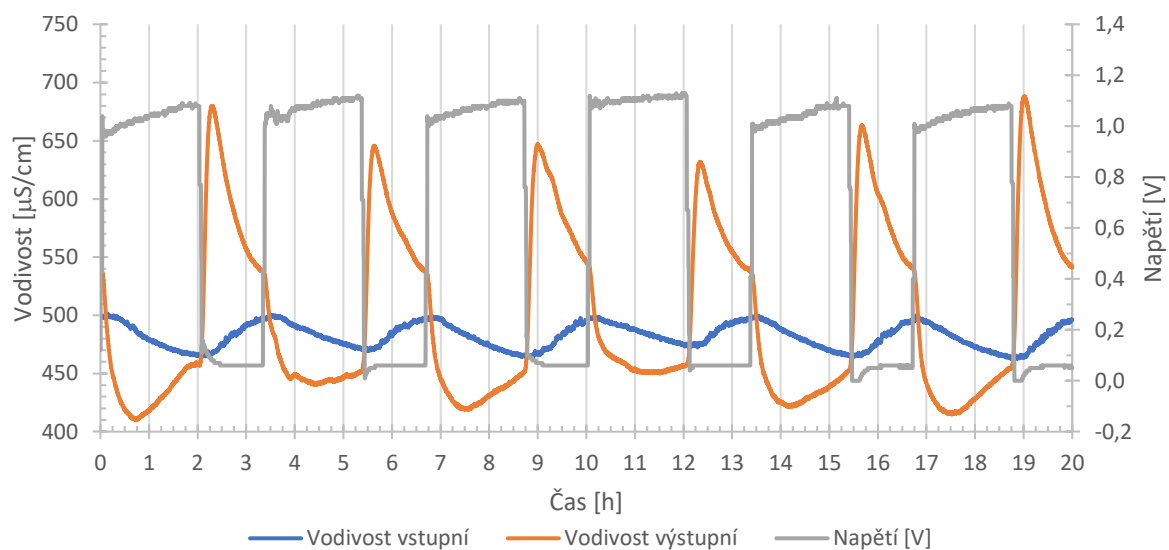
Operator

MemoSuite BasicUser (basic)

8.2 Napětí

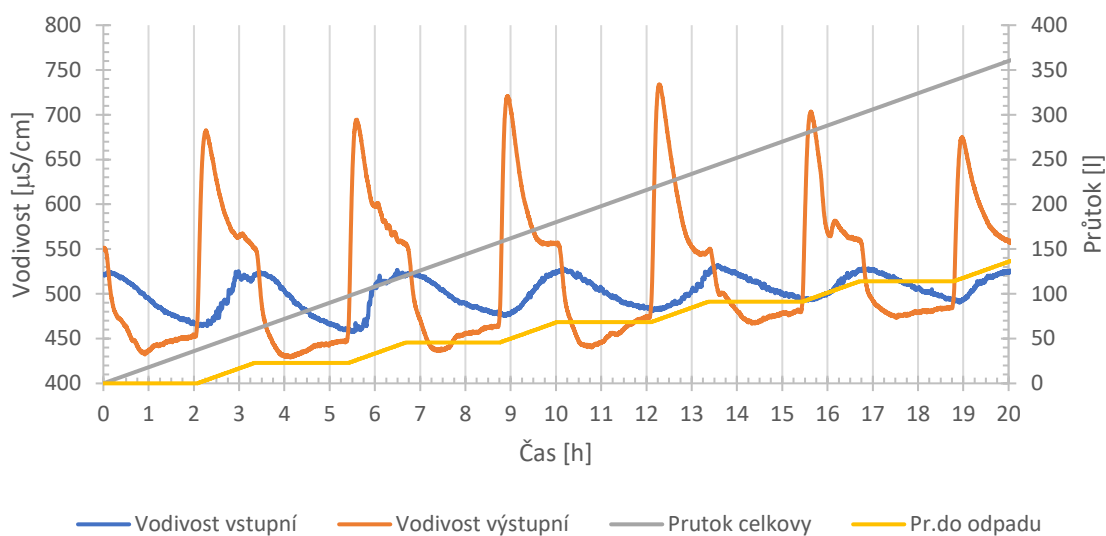


Obrázek 24: Graf závislosti vodivosti a napětí na čase, malá elektroda č. 1, 6 cyklů, při 0,9 V

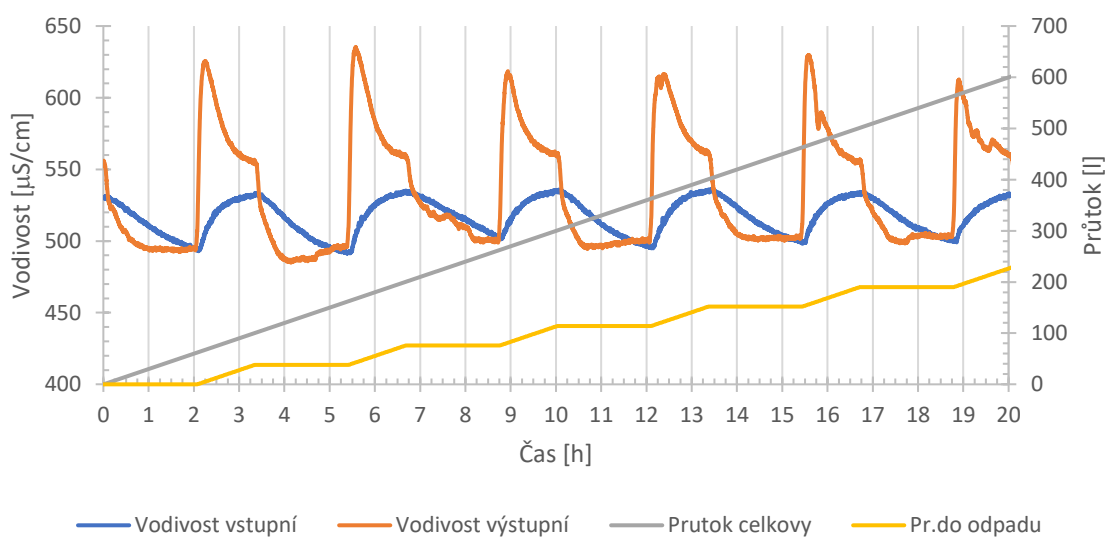


Obrázek 25: Graf závislosti vodivosti a napětí na čase, malá elektroda č. 1, 6 cyklů, při 1,0 V

8.3 Průtok

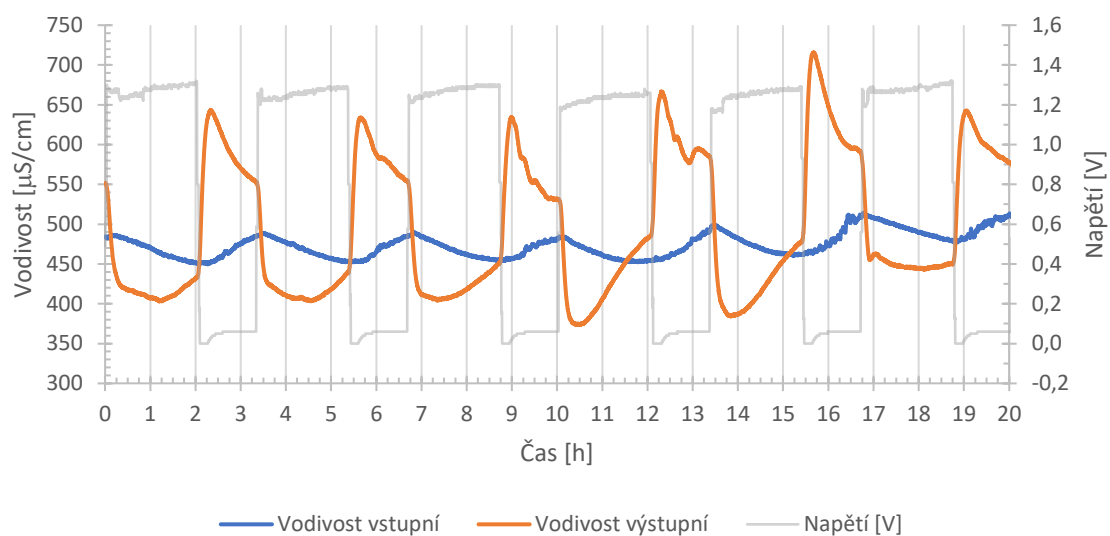


Obrázek 26: Graf závislosti vodivosti a průtoku na čase, malá elektroda č. 1, 6 cyklů, při 0,3 l/min

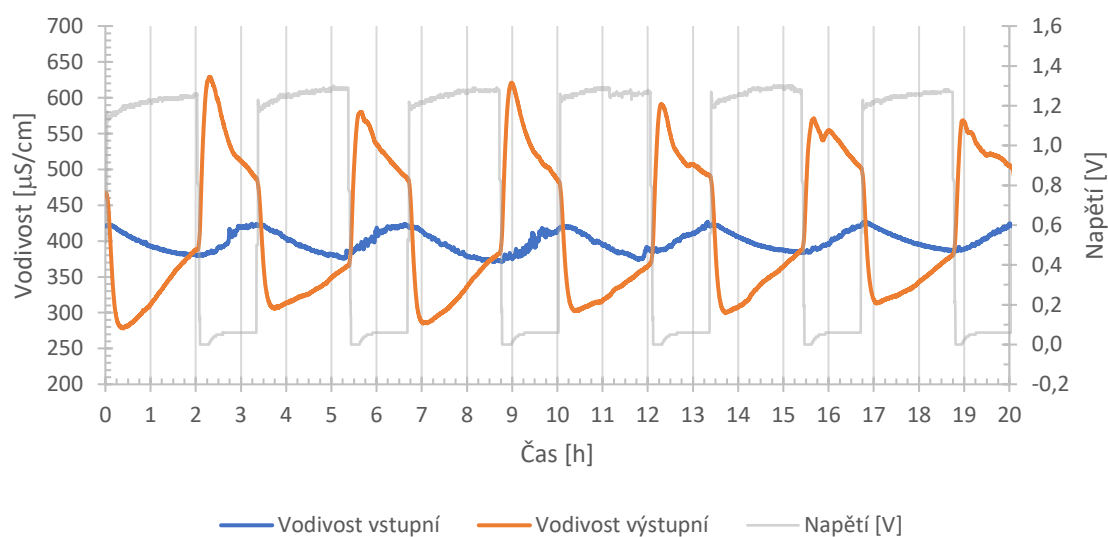


Obrázek 27: Graf závislosti vodivosti a průtoku na čase, malá elektroda č. 1, 6 cyklů, při 0,5 l/min

8.4 Ostatní ionty

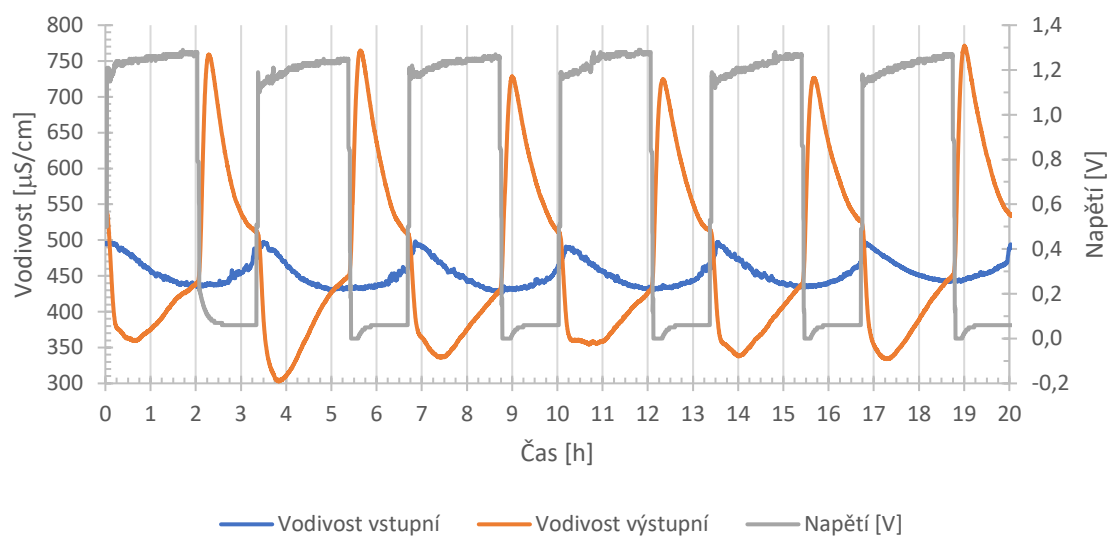


Obrázek 28: Graf závislosti vodivosti a napětí na čase, malá elektroda č. 1, 6 cyklů, v roztoku CaCl_2

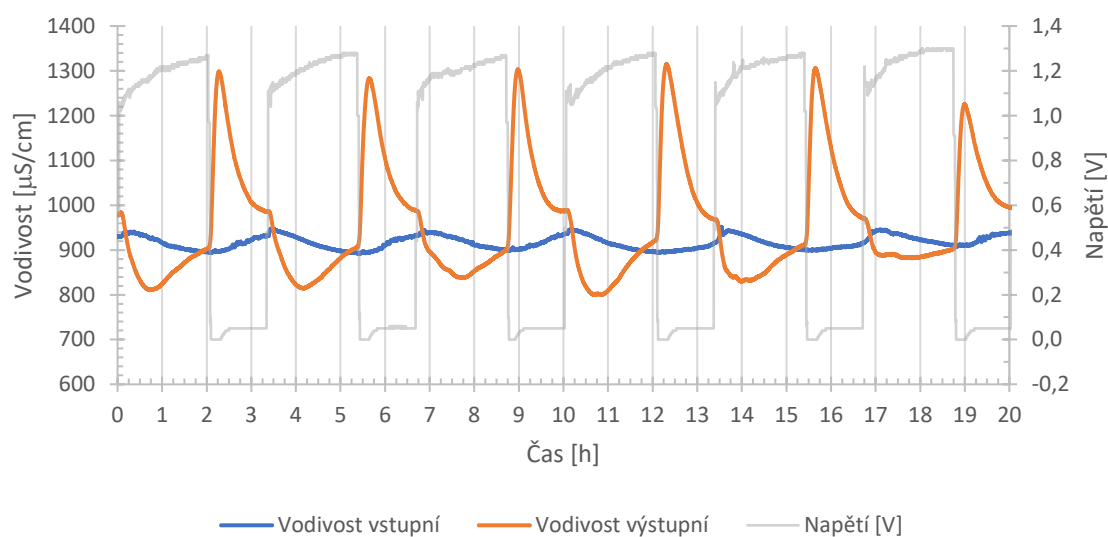


Obrázek 29: Graf závislosti vodivosti a napětí na čase, malá elektroda č. 1, 6 cyklů, v roztoku směsi NaCl a CaCl_2 1:1

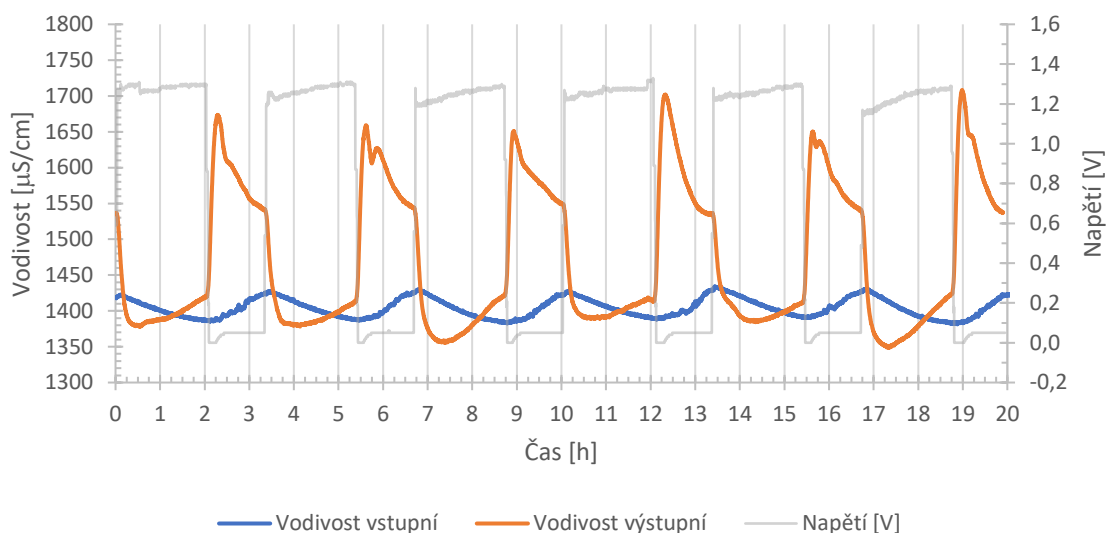
8.5 Počáteční koncentrace



Obrázek 30: Graf závislosti vodivosti a napětí na čase, malá elektroda č. 1, 6 cyklů, při 0,238 g/l NaCl

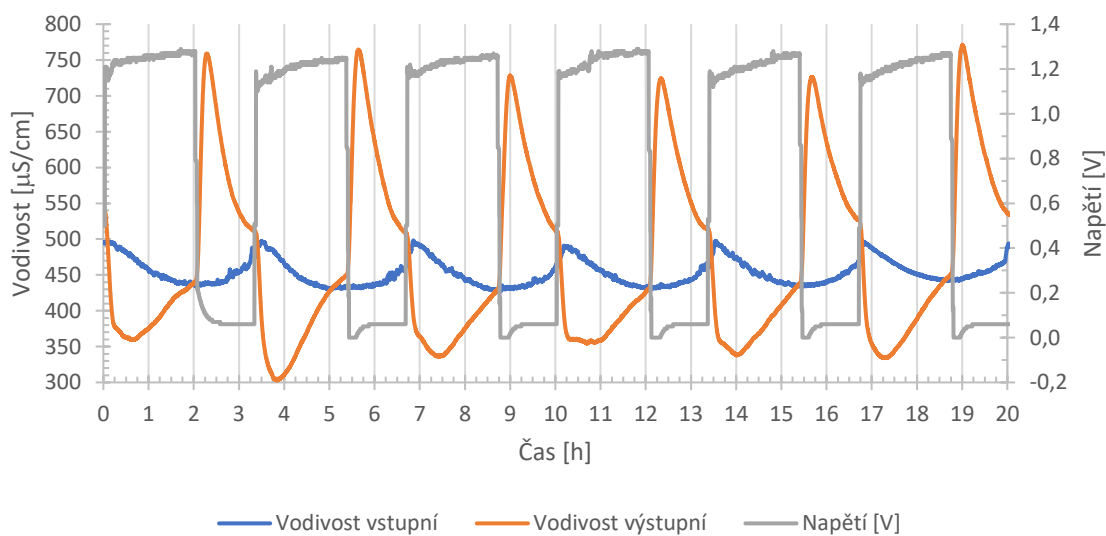


Obrázek 31: Graf závislosti vodivosti a napětí na čase, malá elektroda č. 1, 6 cyklů, při 0,476 g/l NaCl

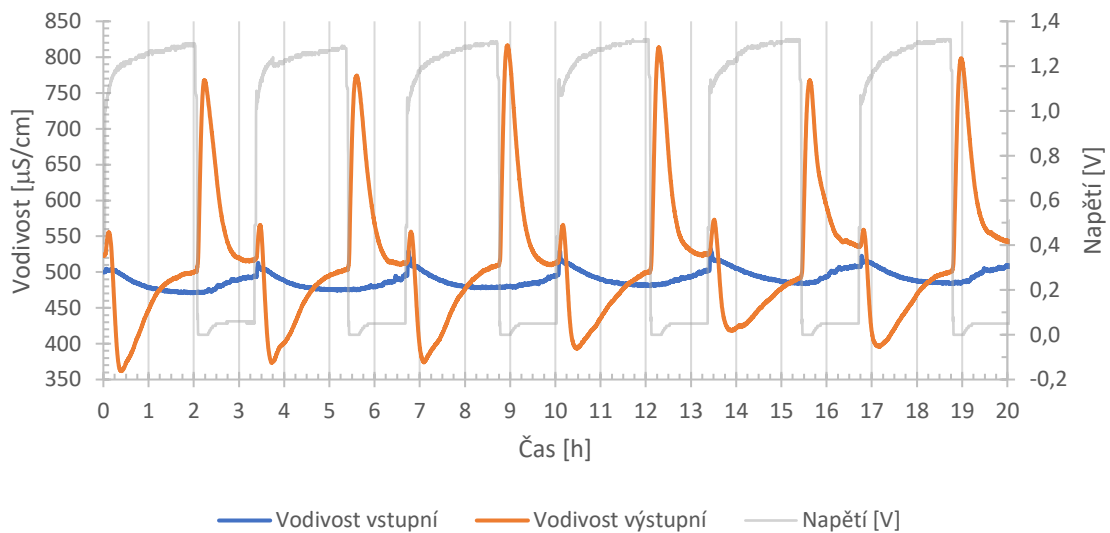


Obrázek 32: Graf závislosti vodivosti a napětí na čase, malá elektroda č. 1, 6 cyklů, při 0,714 g/l NaCl

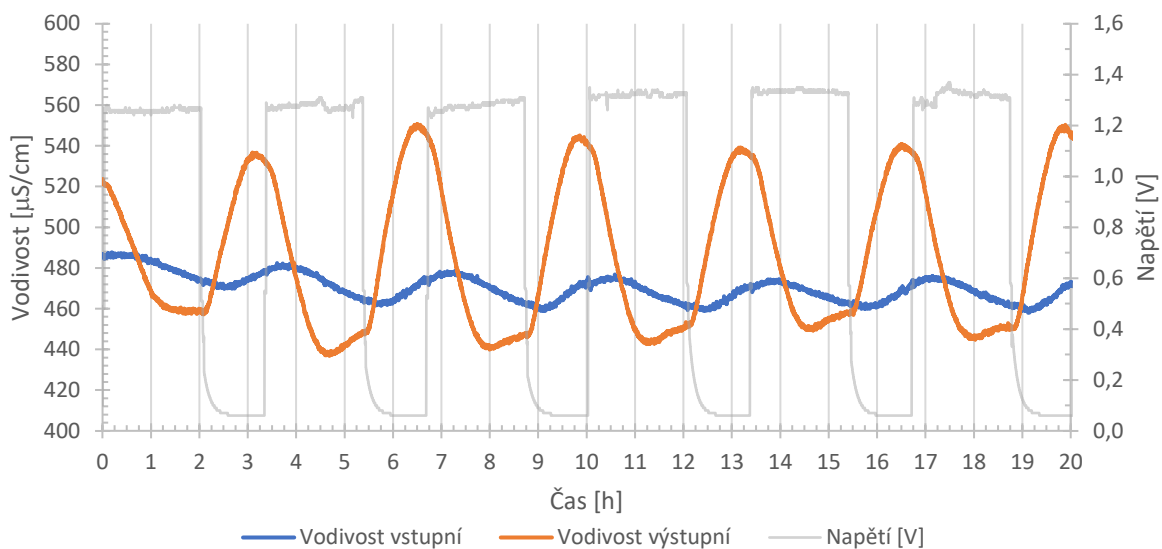
8.6 Elektrody



Obrázek 33: Graf závislosti vodivosti a napětí na čase, malá elektroda č. 1, 6 cyklů



Obrázek 34: Graf závislosti vodivosti a napětí na čase, malá elektroda č. 2, 6 cyklů



Obrázek 35: Graf závislosti vodivosti a napětí na čase, velká elektroda č. 4, 6 cyklů