

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra ekologie a životního prostředí



**Využití nízkonákladových mikrofluidních zařízení pro
orientační analýzu složek životního prostředí**

Ondřej Vjačka

Bakalářská práce

předložena

na Katedře ekologie a životního prostředí

Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci

jako součást požadavků

na získání titulu Bc. v oboru

Ekologie a ochrana životního prostředí

Vedoucí práce: doc. RNDr. Jan Petr, Ph.D.

Olomouc 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. RNDr. Jana Petra, Ph.D.

V Olomouci dne 6.5.2022

Podpis:

Abstrakt

V teoretické části bakalářské práce popisují funkční vlastnosti mikrofluidiky, materiály a metody výroby nízkonákladových mikrofluidních zařízení. Dále podávám základní informace o toxických látkách, jako jsou jejich zdroje, vlastnosti a účinky. V poslední části teorie uvádím metody kvalitativní a kvantitativní analýzy vzorků.

Cílem předložené bakalářské práce bylo nalezení funkčních důkazových reakcí pro vybrané ionty pomocí kapací techniky na filtračním papíře. Sestrojení nízkonákladového mikrofluidního zařízení k detekci vybraných složek životního prostředí s využitím těchto reakcí.

Výsledkem bylo nalezení reagensů, kterými se dají detekovat vybrané ionty na filtračním papíře, a zároveň sestrojení papírového testu, který je schopen detekovat tyto složky ve vodném prostředí.

Klíčová slova

Analýza, indikace, reagenty, toxické ionty, voda

Abstract

In the theoretical part of the bachelor thesis I describe the functional properties of microfluidics, materials and methods of production of low-cost microfluidic devices. I also provide basic information about toxic substances, such as their sources, properties and effects. In the last part of the theory I present methods of qualitative and quantitative analysis of samples.

The aim of the presented bachelor thesis was to find functional proof reactions for selected ions using drip technique on filter paper. Construction of a low-cost microfluidic device for the detection of selected components of the environment using these reactions.

The result was to find reagents that can detect selected ions on filter paper, and at the same time to build a paper test that is able to detect these components in an aqueous environment.

Key words

Analysis, indication, reagents, toxic ions, water

Obsah

Seznam tabulek	viii
Seznam obrázků	ix
Seznam zkratk	xi
Poděkování.....	xii
1 Úvod	1
2 Současný stav řešené problematiky.....	2
2.1 Mikrofluidní systém.....	2
2.1.1 Funkční principy v mikrofluidice	2
2.1.2 Problematika malých objemů.....	4
2.2 Nízkonákladová mikrofluidní zařízení.....	4
2.2.1 Materiály pro nízkonákladové zařízení	4
2.3 Problematika výskytu toxických látek ve vodním prostředí	7
2.3.1 Těžké kovy	7
2.3.2 Karcinogeny	8
2.3.3 Pesticidy	8
2.3.4 Organofosfáty.....	8
2.3.5 Tenzidy	9
2.3.6 Vybrané ionty a jejich negativní účinky na živé organismy	9
2.4 Metody stanovení toxických látek	16
2.4.1 Metody kvalitativní	16
2.4.2 Metody kvantitativní	20
3 Cíle práce.....	23
4 Materiály a metody	24
4.1 Pomůcky	24
4.2 Přístroje	24
4.3 Chemikálie	24
4.4 Důkazové reakce	25
4.4.1 Rtuťné ionty	25
4.4.2 Rtuťnaté ionty	25
4.4.3 Kademnaté ionty	25
4.4.4 Olovnaté ionty.....	26
4.4.5 Arsenitanové ionty	26
4.4.6 Arseničnanové ionty	26

4.4.7	Nikelnaté ionty	26
4.4.8	Barnaté ionty	26
4.4.9	Stříbrné ionty	26
4.4.10	Zinečnaté ionty.....	26
4.4.11	Chromanové ionty.....	26
4.4.12	Dichromanové ionty.....	27
4.4.13	Amonné ionty.....	27
4.4.14	Dusitanové ionty	27
4.4.15	Dusičnanové ionty.....	27
4.4.16	Kyanidové ionty.....	27
4.4.17	Fosforečnanové ionty.....	27
4.4.18	Mědnaté ionty	27
4.4.19	Bismutité ionty.....	27
4.5	Výroba nízkonákladového mikrofluidního zařízení.....	28
5	Výsledky a jejich diskuze	29
5.1	Ověřování důkazových reakcí.....	29
5.2	Optimalizace mikrofluidního zařízení	39
6	Závěr	44
7	Literatura.....	45
	Online zdroje	47

Seznam tabulek

Tabulka 1 Charakteristika vybraných iontů I. (Křížkova et al. 2009; Pitter 2009; Petrlík et al. 2010; Housecroft a Sharpe 2014).....	10
Tabulka 2 Charakteristika vybraných iontů II. (Křížkova et al. 2009; Pitter 2009; Petrlík et al. 2010; Housecroft a Sharpe 2014).....	11
Tabulka 3 Charakteristika vybraných iontů III. (Křížkova et al. 2009; Pitter 2009; Petrlík et al. 2010; Housecroft a Sharpe 2014).....	12
Tabulka 4 Charakteristika vybraných iontů IV. (Křížkova et al. 2009; Pitter 2009; Petrlík et al. 2010; Housecroft a Sharpe 2014).....	13
Tabulka 5 Charakteristika vybraných iontů V. (Křížkova et al. 2009; Pitter 2009; Petrlík et al. 2010; Housecroft a Sharpe 2014).....	14
Tabulka 6 Chemické ukazatele pro pitnou vodu a odpadní vodu z vybraných průmyslových odvětví (Vyhláška č. 252/2004 Sb.; Nařízení vlády č. 401/2015 Sb.).....	15
Tabulka 7 Instrumentální indikátory.....	20
Tabulka 8 Nejčastěji používané acidobazické indikátory (Skoog et al. 2019).....	21
Tabulka 9 Barevné přechody důkazových reakcí.....	29
Tabulka 10 Křížové reakce iontů s vybranými reagensy I.	35
Tabulka 11 Křížové reakce iontů s vybranými reagensy II.	36
Tabulka 12 Křížové reakce iontů s vybranými reagensy III.....	37
Tabulka 13 Křížové reakce iontů s vybranými reagensy IV.....	38

Seznam obrázků

Obrázek 1	Blokové schéma typického plynového chromatografu (Skoog et al., 2019)	17
Obrázek 2	Blokové schéma typického kapalinového chromatografu (Skoog et al. 2019)	18
Obrázek 3	Indikace jodidem draselným	30
Obrázek 4	Indikace chromanem draselným	30
Obrázek 5	Indikace difenylkarbazidem v kyselině dusičné	30
Obrázek 6	Indikace chromanem draselným	30
Obrázek 7	Indikace jodidem draselným	30
Obrázek 8	Indikace difenylkarbazidem v prostředí octanu sodného	30
Obrázek 9	Indikace difenylkarbazidem	30
Obrázek 10	Indikace jodidem draselným	31
Obrázek 11	Indikace chromanem draselným	31
Obrázek 12	Indikace sulfanem sodným	31
Obrázek 13	Indikace dimethylglyoximem	31
Obrázek 14	Indikace chromanem draselným	31
Obrázek 15	Indikace hexakynoželezitanem draselným	32
Obrázek 16	Indikace chromanem draselným	32
Obrázek 17	Indikace hydroxidem sodným	32
Obrázek 18	Indikace sulfanem sodným	32
Obrázek 19	Indikace hexakynoželezitanem draselným	32
Obrázek 20	Indikace dusičnanem stříbrným	32
Obrázek 21	Indikace difenylkarbazidem	32
Obrázek 22	Indikace dusičnanem olovnatým	33
Obrázek 23	Indikace difenylkarbazidem	33
Obrázek 24	Indikace dusičnanem stříbrným	33
Obrázek 25	Indikace síranem měďnatým	33
Obrázek 26	Indikace α -naftolem a sulfanilovou kyselinou	33
Obrázek 27	Indikace difenylaminem	34
Obrázek 28	Indikace síranem měďnatým a hydroxidem amonným	34
Obrázek 29	Indikace chloridem železitým	34
Obrázek 30	Indikace dusičnanem stříbrným	34
Obrázek 31	Indikace hexakynoželezitanem draselným	34
Obrázek 32	Indikace jodidem draselným	35
Obrázek 33	Indikace chromanem draselným	35
Obrázek 34	Schématické rozvržení reagentů na čipu	40
Obrázek 35	Nízkonákladové mikrofluidní zařízení	40
Obrázek 36	Papírový test s dusičnanem rtuťným	41
Obrázek 37	Papírový test s dusičnanem rtuťnatým	41
Obrázek 38	papírový test s dusičnanem olovnatým	41
Obrázek 39	Papírový test se síranem nikelnatým	41
Obrázek 40	Papírový test s dusičnanem stříbrným	41
Obrázek 41	Papírový test s dichromanem draselným	41
Obrázek 42	Papírový test s dusitanem sodným	42
Obrázek 43	Papírový test s hydrogenfosforečnanem sodným	42
Obrázek 44	Papírový test se síranem měďnatým	42
Obrázek 45	Papírový test s kyanidem draselným	42
Obrázek 46	Papírový test s chromanem draselným	42
Obrázek 47	Papírový test s dusičnanem barnatým	42
Obrázek 48	Papírový test s hydroxidem amonným	42

Obrázek 49 Papírový test s chloridem kademnatým.....	42
Obrázek 50 Papírový test se síranem zinečnatým.....	43
Obrázek 51 Papírový test s dusičnanem bismutitým	43

Seznam zkratek

ADP	adenosindifosfát
ATP	adenosintrifosfát
CNS	centrální nervová soustava
DNA	deoxyribonukleová kyselina
EDC	detektor elektronového záchytu
GC-MS	plynová chromatografie s hmotnostní spektrometrií
HNA	směs kyselin fluorovodíkové, dusičné a octové
HPLC	vysokoúčinná kapalinová chromatografie
MEMS	mikro elektro mechanický systém
MH	mezní hodnota
NMH	nejvyšší mezní hodnota
PDMS	polydimethylsiloxan
PC	polykarbonát
PCR	polymerázová řetězová reakce
SI	mezinárodní systém jednotek
TCD	tepelně vodivostní detektor
UHPLC	ultra-vysokoúčinná kapalinová chromatografie

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce doc. RNDr. Janu Petrovi, Ph.D. za jeho rady a připomínky při práci v laboratořích a během tvorby bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat členům své rodiny, kteří mě podporovali a motivovali během psaní bakalářské práce.

1 Úvod

Život na zemi je neodmyslitelně spjat s přítomností vody, která slouží jako médium většiny biologických a chemických procesů v buňce. Zdrojem vody na zemi jsou převážně kosmická tělesa nebo adice vodíku a kyslíku. Vody na zemi je nepřeborné množství, ale jen malé množství se dá využít jako užitková voda, a ještě méně jako pitná voda.

Průměrná spotřeba vody v Praze na jednoho člověka za 24 hodin v roce 2021 činila 113 l. Osmdesát % použité vody připadalo na mytí, osobní hygienu a toaletu (PVK 2022). Množství spotřebované vody by se dalo snížit používáním „šedé“ vody, ale nesnížilo by se množství vyprodukovaných kontaminantů.

V odpadních vodách z domácnosti se vyskytují především odpady metabolismu, nestravitelné zbytky, povrchově aktivní látky a zbytky jídla. V průmyslových odpadních vodách nalezneme nechtěné příměsi rud, rozpouštědla atd. Kontaminované vody jsou odváděny do odkališť nebo čištěny v čističkách odpadních vod řadou chemických a biologických postupů.

Tyto místa jsou specifická vysokou koncentrací toxických látek, a pokud by došlo k nehodě nebo úniku, mělo by to katastrofický dopad na ekosystém. Nejlepšími příklady je únik kyanidu v Baia Mare v roce 2000 (Batha 2000) a protržení odpadní nádrže s toxickým bahnem státě Minas Gerais v roce 2015 (Rifai 2015). Velmi medializovaným případem byla otrava řeky Bečvy, kde se dlouho nevědělo, co bylo příčinou masivního úhynu ryb.

Odpověď přinesla až laboratorní analýza, ta se skládá z odběru vzorku, jejich převozu a analýzy. Postup je zdlouhavý a navíc nákladný, ale podává přesnou zprávu o typu a míře znečištění. Řešením by mohl být mikrofluidní čip. K identifikaci by využíval jednoduchých reakcí založených na barevných změnách. Analýza by probíhala v jednotkách minut přímo na zasaženém území, což by poskytlo rychlejší nasazení cílených opatření. Další výhodou jsou nízké nároky na obsluhu a vyhodnocení výsledků, což se zásadně liší od laboratorní analýzy.

2 Současný stav řešené problematiky

2.1 Mikrofluidní systém

Mikrofluidika je vědním oborem zabývající se chováním tekutin v omezených malých objemech, jako příklady si můžeme uvést mikrokanálky, kapiláry, trysky, tenké vodní filmy atd. Pojem malý objem si můžeme definovat jako těleso, jehož jedna strana nepřesahuje rozměr 1 mm. Pro takto malé objemy se snižuje účinnost gravitační síly a převládajícími silami se stává kapilární síla a viskózní síla. Pokud překročíme velikosti menší než 1 μm , vstupujeme do oblasti nanofluidiky.

Historicky je mikrofluidika podmnožinou elektroforézy, techniky pro separaci směsí molekul na jejich složky pomocí elektrických polí. První mikrofluidní zařízení měla sloužit ke zlepšení elektroforetické separaci. V první polovině 90. let 20. století se začala mezi analytickými chemiky šířit myšlenka na vytvoření miniaturizovaného fluidního analytického systému. Takového zařízení by mělo poskytovat hned několik výhod: snížení spotřeby činidel, snížení vyprodukovaného odpadu, možnost analýzy velmi malých objemů atd. Chování tekutin v mikrokanálcích bylo odlišné a vedlo k zavedení oboru mikrofluidika. (Folch 2013)

2.1.1 Funkční principy v mikrofluidice

Podstata chování kapalin na mikro úrovni se od makrofluidního chování zásadně liší. Fyzikálních vlastností, jenž v makrofluidice nešlo naplno využít, lze využít pro nové účely v mikrofluidice (Tesař 2008). Mikrofluidními funkčními principy jsou viskozita, Reynoldsovo číslo, laminární proudění, Pecletovo číslo, difúze, kapilární relaxace, zeta potenciál, povrchové napětí a smáčení.

2.1.1.1 Viskozita

Viskozita je vlastnost média, která umožňuje přenos smykových sil z jednoho předmětu na druhý v tomto médiu. Kapaliny s nízkou viskozitou, jako je voda, mléko špatně přenášejí energii z jednoho předmětu na druhý. Naopak je tomu u kapalin s vysokou viskozitou, např. sirup nebo med, zde je energie jednoho předmětu efektivněji přenesena na druhý. Definice absolutní viskozity je tangenciální síla na jednotku plochy potřebná k posunutí jedné roviny vzhledem k jiné jednotkové vzdálenosti od sebe při jednotkové rychlosti (Folch 2013).

2.1.1.2 Reynoldsovo číslo

Pro proudění existuje kvantitativní bezrozměrný výraz, který umožňuje předpovídat chování systému na základě použité tekutiny, rozměrů nádoby a rychlosti pohybu tekutiny. Dle velikosti Reynoldsova čísla se zjišťuje, zda půjde o laminární proudění nebo o turbulentní proudění. Reynoldsonovo číslo (R_e) je definováno rovnicí (Tesař 2008):

$$Re = \frac{d\rho v}{\eta}$$

Kde:

- d : Průměr kanálku
- ρ : Hustota kapaliny
- v : Průměrná rychlost proudění tekutiny
- η : Dynamická viskozita

2.1.1.3 Laminární proudění

Je charakteristický pro nízké Reynoldsovo číslo, přibližně nižší než 2000. Od turbulentního proudění se odlišuje stálým laminárním prouděním. Částice blízko pevného povrchu se pohybují přímočaře rovnoběžně s tímto povrchem (Noakes 2009). Zatímco molekuly sledují své přímé, pravidelné dráhy a nemůžou udělat ostrý obrat (White 2011), průchod molekul průtokovými liniemi je zajišťován difúzí. Směrem od pevného povrchu, kde je rychlost nulová, parabolicky roste ke středu kanálku.

2.1.1.4 Pecletovo číslo

Pecletovo číslo (Pe) je bezrozměrnou veličinou, popisující transportní jevy v kontinuu. Definováno jako poměr rychlostí advekce k rychlostí difúze (Folch 2013):

$$Pe = \frac{uL}{D}$$

Kde:

- u : průměrná rychlost proudění tekutiny
- L : průměr kanálku
- D : difúzní koeficient

2.1.1.5 Difúze

Difúze je makroskopický výsledek tepelně řízeného mikroskopického pohybu částic. Jeden ze základních mechanismů transportu hmoty, při kterém se částice (atomy, ionty, molekuly) vzájemně pohybují (Folch 2013). Je nevratný a zcela náhodný, proto nelze pohyb jednotlivé částice předpovědět. Naštěstí je hromadný pohyb částic docela předvídatelný.

Difúze může velmi efektivně transportovat částice na krátké vzdálenosti, ale na dlouhé vzdálenosti je méně důležitým faktorem. V mikrofluidních zařízeních se malé částice mohou pohybovat velmi rychle na krátké vzdálenosti (Kellner et al. 2004), ale na dlouhé vzdálenosti s nízkým difúzním koeficientem je difúze překážkou transportu.

2.1.1.6 *Povrchové napětí*

Povrchové napětí je vlastnost povrchu kapaliny, která způsobuje, že její povrch ulpívá na jiný povrch (pevný, kapalný nebo plynný), a není tedy vlastností samotné kapaliny, ale vlastností jejího rozhraní s jiným povrchem (Folch 2013). V případě kapalin pojem povrchová energie odpovídá povrchovému napětí.

2.1.1.7 *Smáčení*

Smáčení je samovolné pronikání tekutiny do mikrokanálku (za předpokladu, že stěny jsou hydrofilní), rychlost postupu tekutiny se postupně zpomaluje.

2.1.1.8 *Kapilární relaxace*

Gradient kapilárního tlaku, definovaný zakřivením rozhraní z deformace podél povrchu, vytváří tok omezený viskózním napětím. V praktických mikrofluidních systémech, emulzích, pěnách nebo porézních médiích se rozhraní kapiček neustále mění a uvolňují, zejména kvůli složité topografii skutečných systémů (Kerdrion et al 2019).

2.1.1.9 *Zeta potenciál*

Zeta potenciál je elektrický potenciál na úrovni skluzu. Tato hladina je rozhraní, které odděluje mobilní tekutinu od tekutiny ulpívající na povrchu.

2.1.2 *Problematika malých objemů*

Jak se měřicí systém zmenšuje, poměr povrchu k objemu se zvyšuje. Tento poměr je vážným problémem při chemickém testování, kde se testovaný analyt může adsorbovat na stěny kanálku (Folch 2013).

2.2 *Nízkonákladová mikrofluidní zařízení*

2.2.1 *Materiály pro nízkonákladové zařízení*

2.2.1.1 *Skleněné mikročipy*

Sklo jako materiál pro výrobu mikrofluidních prvků má několik příznivých vlastností, např. chemicky inertní, izolační, transparentní. Nejčastěji používaným sklem je Corning Pyrex 7740 kvůli tepelné roztažnosti obsaženého křemíku. Používá se také křemenné sklo, sodnovápenaté sklo a sklo FOTURAN (Li a Zhou 2013).

2.2.1.1.1 *Výroba skleněných mikročipů*

Techniky výroby mikrofluidních zařízení na bázi skla nebyly široce prozkoumány a nebyly vyvinuty stejným způsobem jako křemík. Navzdory tomu se sklo používá při výrobě mikrofluidních zařízení, protože mnoho biochemických reakcí probíhajících v těchto médiích bylo charakterizováno a standardizováno (Li a Zhou 2013).

- Chemické leptání za mokra (Zhang et al. 2001), jako hlavní leptadlo se využívá kyselina fluorovodíková. Další složky, jako je kyselina chlorovodíková, kyselina dusičná a fluoroamonný-pufř mohou být také přidány pro řízení rychlosti leptání (Li a Zhou 2013).
- Plazmového leptání (Li a Zhou 2013), během leptání se do plynné fáze zavádějí leptadla, např. CHF_3 , Ar a CF_4 , rychlost leptání silně klesá se zvyšujícím se podílem netěkavých oxidů produkovaných během leptání, což vede ke snižování rychlosti leptání ($10 \text{ nm} \cdot \text{min}^{-1}$) (Ronggui a Righini 1991).
- Práškové tryskání (Schlautmann et al. 2001), během kterého jsou ostré částičky oxidu hlinitého velkou rychlostí vystřelovány po dobu 10 minut na substrát chráněný odolnou fólií, která se nakonec odstraní v 10 % hydroxidu draselném.
- Laserové mikroobrábění (Ke et al. 2005), sklo se selektivně odstraňuje pulzní laserovou ablací, během které vznikají bublinky, ty odnášejí úlomky pryč z ošetřené plochy.
- Ultrazvukové vrtání (Li a Zhou 2013).

2.2.1.2 Křemíkové mikročipy

Vysoce čistý křemík je obvykle extrahován přímo z křemene nebo jiných sloučenin křemíku elektrolýzou roztavené soli a přeměněn v Czochralského procesu na vysoce čisté monokrystaly používané v polovodičovém průmyslu a v MEMS a mikrofluidice (Li a Zhou 2013). Široká dostupnost a pokročilé technologie zpracování křemíku v polovodičovém průmyslu usnadňují vývoj prvních mikrofluidních zařízení.

2.2.1.2.1 Výroba křemíkových mikročipů

Mikrovýroba mikrofluidních zařízení z křemíku se zjednodušeně rozděluje na hromadné mikroobrábění a povrchové mikroobrábění.

- V masové mikromechanice se fotolitograficky definovaný vzor aplikuje na křemíkový plátek pro mikrofluidní kanály a komory. Vzorec je pak konstruován trávením kombinace kyseliny fluorovodíkové, kyseliny dusičné a kyseliny octové. Změnou poměru směsi kyselin v HNA lze řídit rychlost leptání od 0,1 do více než $100 \mu\text{m}/\text{min}$ (Li a Zhou 2013). Nakonec se připevní druhý křemíkový nebo skleněný plátek a mikromechanický systém se utěsňuje.
- Mikroobrábění povrchové probíhá ve dvou krocích. V prvním kroku se fotolitograficky označí vzor mikrofluidního kanálku, poté se použije obětovaný materiál, např. oxid křemičitý nebo nitridu křemíku, a nakonec je potažen polysilikonovým konstrukčním materiálem. Ve druhém kroku je zařízení ošetřeno kyselinou fluorovodíkovou, která způsobuje vyleptání obětovaného materiálu a vytváří mikrofluidní kanály. (Li a Zhou 2013)

2.2.1.3 *Polydimethylsiloxanové mikročipy*

PDMS je k dispozici v různých formách, jako je kapalina, gel, elastomer, pryskyřice a pryž a je široce používán v mikrofluidních aplikacích v analytické chemii (Li a Zhou 2013). PDMS se skládá ze dvou bočních methylových ramen a siloxanového hlavního řetězce, které se opakují a tvoří polymerní řetězce.

2.2.1.3.1 Výroba PDMS mikročipů

Proces používaný k výrobě mikrozařízení PDMS se nazývá měkká litografie (Xia a Whitesides 1998). V případě měkké litografie je důležité vytvořit odpovídající hlavní formu. Jednou možností je fotolitografické značení definované geometrie mikrokanálku na křemíkovou plátku a následné nanesení vyčnívajících prvků (Xia a Whitesides 1998). Dalším způsobem výroby hlavní formy je mikroobrábění velkého množství křemíku (Li a Zhou 2013). Forma se poté naplní PDMS základem, zasíťování a polymerizace se provádí aplikací tepla. Negativní kopie se vyjme z formy a utěsní se druhou vrstvou PDMS, aby se vytvořilo mikrozařízení.

2.2.1.4 *Polykarbonátové mikročipy*

PC je termoplastický polymer s vysokou pevností a průhledností v celém viditelném spektru. Oproti ostatním plastům má nízkou chemickou odolnost vůči organickým rozpouštědlům. Vzhledem ke své vyšší teplotě skelného přechodu a nízkým výrobním nákladům je PC ideálním materiálem pro výrobu zařízení na zpracování odpadu a používá se v mnoha biomedicínských a bioanalytických aplikacích, jako je PCR (Li a Zhou, 2013).

2.2.1.4.1 Výroba PC mikročipů

- Metody přímého strukturování, kde řadíme laserová ablace (Waddell 2002) a mikrofrézování jednobřitou stopkovou frézou (Ogonczyk et al. 2010).
- Metody replikační, jako je vstřikování a ražení za tepla (Li a Zhou 2013).
- Při výrobě byly využity různé způsoby lepení, které byly rozděleny do třech skupin, na tepelné procesy (Ogonczyk et al. 2010) využívají kompresi, chemické vazby vyvolané modifikací povrchové chemie dosažené plazmovým ošetřením, nebo zavedením povrchově aktivních skupin (Li a Zhou 2013) a adhezivní metodou použitím komerčních lepidel.

2.2.1.5 *Papírové mikročipy*

Papír je síť celulósových vláken, která díky své poréznosti a hydrofilnímu potenciálu může vytvářet kapilární tok pro transport tekutin. Rychlost pohybu v mikrofluidních kanálcích papíru závisí na mnoha faktorech, jako je velikost pórů, poréznost, povrchová energie papíru a také viskozita kapaliny, a může být odhadnuta pomocí Lucas-Washburnovi rovnice (Lim et al. 2019). Tento samočinně čerpací a sací mechanismus z něj činí atraktivní materiál pro výrobu levných mikrofluidních zařízení pro diagnostické aplikace. První papírové mikrofluidní zařízení

bylo představeno Mullerem (Müller a Clegg 1949). Tým z Harvardské univerzity, skupina prof. Whitesidese, vyvinul nové strategie vzorování s jemnějším řízením dráhy toku a rychlosti toku (Martinez et al. 2007). Vzorování lze obecně provést 3 různými principy. Vzorováním papírových zařízení vedla k vytvoření mikrofluidního zařízení s paralelní analýzou různých analytů, jenž prokázal Whitesides se svým týmem (Martinez et al. 2007).

Výroba papírových mikročipů (Li a Zhou 2013):

- Fotolitografie
- Inkoustové leptání
- Vykreslování
- Voskový tisk
- Povrchové úpravy
- Řezání papíru

2.3 Problematika výskytu toxických látek ve vodním prostředí

Obecně jsou toxické látky všechny látky, které při požití, vdechnutí nebo kontaktu s pokožkou způsobují vážné biologické poškození, a to i v malých množstvích. I čistá voda může způsobit otravu při požití velkého množství vody v krátké době. Nadužívání běžně používaných a dostupných léků může způsobit těžkou otravu, např. acylpyrin nebo vitamíny. Toxické látky mohou mít akutní nebo dlouhodobé účinky. Akutní účinky se nejčastěji vyskytují jako dermatitida v místě působení, jako alergická reakce nebo jako respirační potíže. Dlouhodobě působící toxické látky mohou být mutagenní nebo karcinogenní. (Čermáková a Štěpánová 2003)

Podle hygienických závadnosti Pitter rozdělil kovy, respektive kovy a polokovy do následujících čtyř skupin (2009):

1. Toxické kovy a polokovy: Hg, Cd, Pb, As, Se, Be, V, Ni, Ba, Ag a Zn
2. Kovy či polokovy s karcinogenními nebo teratogenními účinky: As, Cd, Cr, Ni, Be
3. Kovy a polokovy vykazující chronickou toxicitu: Hg, Cd, Pb, As
4. Kovy ovlivňující organoleptické vlastnosti: Mn, Fe, Cu, Zn

2.3.1 Těžké kovy

V přírodě se vyskytuje přirozeně 90 prvků z toho je 53 těžkých kovů. Těžké kovy mají charakteristickou vlastnost, jejich hustota je vyšší než $5000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Rtuť, kadmium a zinek patří do 12. skupiny, tzn. d-orbital s valenčními elektrony je zaplněn (Housecroft a Sharpe 2014). Zbývající těžkým kovům chybí jeden nebo více elektronů, aby měly plně obsazený valenční orbital. Volné d-orbitály umožňují reakcím kovů s ligandy za vzniku redoxních komplexních

sloučenin, kde se těžké kovy vyskytují jako centrální ionty (Nies 2003). S rostoucí koncentrací iontu těžkých kovů v organismu roste pravděpodobnost navázání iontu na proteinové skupiny SH, COOH a NH₂ a vzniku cytotoxických komplexních sloučenin nebo enzymatických jedů. Dále mohou ionty produkovat volné radikály poškozující DNA a nahrazovat esenciální kovy, např. olovo se váže místo vápníku v kostní tkáni (Bencko et al. 1995).

Nesprávně bývají těžké kovy používané, jakou synonymum pro toxické kovy. Řada těžkých kovů vykazuje toxické účinky, ale třeba železo a mangan s hustotou přesahující 7000 kg·m⁻³ nelze je mezi toxické kovy zařadit, naopak beryllium je kov a toxický, ale se svou hustotou 1848 kg·m⁻³ nepatří mezi těžké kovy. (Pitter 2009)

Toxicita kovů ve vodě závisí na teplotě, pH a celkovém složení vody, což ovlivňuje jejich specifikaci. Jednoduché iontové formy jsou většinou toxické a anorganické a organické komplexy jsou obecně méně toxické. S formou výskytu souvisí i rychlost transportu do buněk. (Pitter 2009)

2.3.2 Karcinogeny

Karcinogeny se dělí na mutagenní neboli genotoxické a epigenetické. Genotoxické karcinogeny mohou vyvolat rakovinu, již při nepatrných dávkách a nelze u nich spolehlivě stanovit práh účinnosti. Epigenetické karcinogeny nepoškozují genetický materiál, ale podporují růst iniciovaných buněk. V regenerujících se tkáních probíhá rychlejší dělení buněk. Se zvyšující se frekvencí dělení buněk narůstá pravděpodobnost vzniku spontánních mutací, proto lze nalézt u epigenetických karcinogenech práh účinnosti až při cytotoxických dávkách. (Linhart 2012)

2.3.3 Pesticidy

Jako pesticid je označovaná látka či směs látek, jenž poskytují ochranu proti plevelům, houbám a živočišným škůdcům, kteří nepříznivě ovlivňují užitkové rostliny v zemědělství a lesnictví. Lze je také uplatnit ve vodohospodářství. Pesticidy můžeme rozdělit podle původu (přírodní a syntetické), funkční chemické skupině (např. organochlorové, organofosforové, deriváty fenolu), způsobu působení (kontaktní, požerové, systémové a kombinované) a biologické účinnosti (herbicidy, fungicidy a zoocidy). (Pitter 2009)

2.3.4 Organofosfáty

Chemicky řečeno, organofosfáty jsou estery kyseliny fosforečné, které se používají jako pesticidy. Organofosfáty celkově překonaly některé nevýhody organochlorových pesticidů a postupně je začaly nahrazovat. Na druhou stranu byly jednou z hlavních příčin vzniku

sloučenin, které způsobují nejvíce toxických otrav za rok. Jako pesticidy působí jako kontaktní a požerové toxiny s dočasným reziduálním účinkem (Vlček a Pohanka 2012). Organofosfátové reziduum podléhá takzvané spontánní dealkylaci, známé také jako stárnutí, jejíž trvání se u jednotlivých látek značně liší. Obecný mechanismus účinku je založen na kovalentní vazbě, v závislosti na dávce a jejím rozložení v organismu dochází v centrálním a periferním nervovém systému k patologickým změnám, které mohou souviset s cholinergními krizemi a život ohrožujícími stavy, souvisejícími především s respiračními poruchami (Eddleston et al. 2008).

2.3.5 Tenzidy

Tenzidy jsou součástí aktivních látek v pracích, čistících, mycích, emulgačních, dispergačních a pěnicích prostředcích. Jedná se o organické povrchově aktivní látky, které se již při malých koncentracích významně hromadí (adsorbují) na fázovém rozhraní a snižují tak mezifázovou, res. povrchovou energii. Z chemického hlediska rozdělujeme tenzidy na aniontové, kationtové, neiontové a amfolytické. Toxicky působí především kationtové tenzidy, ty se často používají v dezinfekčních prostředcích. Toxicky působí také, neiontové tenzidy, oxyethylenáty alkylnolů včetně jejich produktů metabolismu. Vykazují obdobnou aktivitu jako ženský hormon estradiol. (Pitter 2009)

2.3.6 Vybrané ionty a jejich negativní účinky na živé organismy

Ionty v různých formách mohou působit zcela odlišně, nedá se charakterizovat jedna skupina pouze jako esenciální a další skupina jako výhradně karcinogenní. Negativní účinky závisí na podobě, jakou iont zrovna zaujímá, v jaké koncentraci je zastoupen, zdali organismus není oslaben nebo umí s toxinem v nějakou podobě pracovat (Housecroft a Sharpe 2014).

Charakteristika vybraných iontů, je uvedena v tabulkách 1-5, v tabulce 6 jsou uvedeny hygienické limity pro pitnou vodu a odpadní vodu z vybraných průmyslových odvětví.

Tabulka 1 Charakteristika vybraných iontů I. (Křížkova et al. 2009; Pitter 2009; Petrlik et al. 2010; Housecroft a Sharpe 2014)

Iont	Přírodní zdroje	Antropogenní zdroje	Kladné vlastnosti	Negativní vlastnosti
Rtuťné a rtuťnaté Hg_2^{+II} a Hg^{+II}	Sulfidické rudy: cinabarin Sopečná činnost	Atmosférické srážky kontaminované spalinami fosilních spalin Z průmyslových odpadních vod Součásti fungicidů, konzervačních přípravků a mořidel osiva		Kumulace v játrech, ledvinách a slezině Akutní vystavení rtuti vede k poškození dýchacích cest, bolesti břicha, způsobuje průjmy, zvracení, slinění a třesu Chronická expozice narušuje nervový systém, negativně působí na vývoj plodů a reprodukční schopnosti Mezi příznaky otravy patří vypadávání zubů, poruchy vnitřního ucha a CNS, šedý lem kolem zubů a vředy na rtech Smrtelná dávka je asi 1 g Možný lidský karcinogen
Olovnatý Pb^{+II}	Rudy: galenit, anglesit, cerusit, hydrocerusit	Olovnaté potrubí Odpadní vody ze zpracování rud, barevné metalurgie, z výroby akumulátorů a z barvení skla Do roku 2021 součásti antidetonačních prostředků		Akumuluje v kostech, ledvinách a jaterních buňkách Ve vysokých dávkách dochází k nevratnému poškození nervové soustavy, ke křečím a k smrti Chronická expozice může vést k poruchám pozornosti Negativně ovlivňuje krvetvorbu, imunitní systém, trávení i reprodukci Možný lidský karcinogen
Nikelnatý Ni^{+II}	Doprovázen sírou, arsenem, antimonem v gersorfitu, pentlanditu, nikelinu, milleritu, garnieritu a pyrrhotinu	Odpadní vody z povrchové úpravy kovů a z barevné metalurgie Součásti glazur barvicích keramiku a sklo Katalyzátor chemických syntéz Hadcové oblasti	Součástí enzymů a proteinů Nezbytný pro bakterie, rostliny a živočichy	V nadměrných dávkách je toxický Při kontaktu s pokožkou vyvolává alergickou reakci Po požití dochází k poškození jater, ledvin, plic, cévní a nervové soustavě Je považován za podezřelý karcinogen

Tabulka 2 Charakteristika vybraných iontů II. (Křížkova et al. 2009; Pitter 2009; Petrlik et al. 2010; Housecroft a Sharpe 2014)

Iont	Přírodní zdroje	Antropogenní zdroje	Kladné vlastnosti	Negativní vlastnosti
Stříbrný Ag^+	Nerosty: argentit a argentopyrit	Důlní a odpadní vody ze stříbrných dolů Odpadní vody z fotografického průmyslu Odpady z elektrotechnického průmyslu Algicidní a baktericidní prostředky		Vazba na jednotlivé báze DNA, především adenin a guanin Rostliny jsou citlivější na přítomnost stříbrných iontů během klíčení Inhibitor řady rostlinných procesů a enzymů Bakteriostatické účinky
Chromany a dichromany CrO_4^{2-} a $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$	Nerosty: chromit a krokoit Doprovází hlinité minerály	Odpadní vody z barevné metalurgie, z povrchové úpravy kovů, z kožedělného průmyslu a z textilního průmyslu Antikorozní prostředky v chladicích okruzích		Dlouhodobá expozice vede k nádorům plic a horních cest dýchacích Vdechováním dochází k podráždění nosu, krvácení z nosu, vzniku vřidků a děr v nosní přepážce Pozření způsobuje žaludeční potíže, vředy, křeče, poškození ledvin a jater, může končit smrtí Ve vodě je vysoce toxický Lidský karcinogen U zvířat teratogenní a karcinogenní
Dusitany NO_2^-	Nitrifikací amoniaku nebo redukcí dusičnanů	Odpadní vody z výroby barev, ze strojírenských zvodů a z kovoprůmyslu Součástí inhibitorů koroze a nemrznoucích kapalin		V krvi reagují s hemoglobinem za vzniku methemoglobinu, který není schopen reverzibilně vázat kyslík Ohrožuje převážně kojence
Dusičnany NO_3^-	Chilský ledek Nitrifikací amoniaku a sekundárním rozkladem dusíkatých organických látek	Hnojením dusíkatých hnojiv Spalováním fosilních paliv		Redukcí na dusitany střevními bakteriemi dochází k methemoglobinémii, krev není schopna vázat a přenášet kyslík

Tabulka 3 Charakteristika vybraných iontů III. (Křížkova et al. 2009; Pitter 2009; Petrlík et al. 2010; Housecroft a Sharpe 2014)

Iont	Přírodní zdroje	Antropogenní zdroje	Kladné vlastnosti	Negativní vlastnosti
Fosforečnany $\text{PO}_4^{-\text{III}}$	V minerálech: apatit, variscit, strengit, vivianit a struvit Vzniká rozkladem biomasy	Splaškové vody a odpady z živočišné výroby Odpadní vody s pracími, čisticími a odmašťovacími a mycími prostředky	Esenciální živinou rostlin Fosforečné estery jsou nositelem dědičné informace Součástí ATP a ADP	Viz organofosfáty
Mědnatý $\text{Cu}^{+\text{II}}$	Ve formě sulfidů: chalkopyrit, chalkosin Hydroxid- uhličitanů: malachit a azurit Oxid: tenorit	Vodovodní potrubí, střechy, okapy, nádobí Odpadní vody z povrchové úpravy kovů Algicidní prostředky	U vyšších rostli a živočichů je součástí enzymatických řetězců: dýchání, metabolismus sacharidů a železa, důležitý pro správný růst kostí a dalších tkání	Vysoké dávky u člověka vedou k poškození jater a ledvin, vzniku anemie Extrémně vysoké dávky způsobují smrt Nedostatek mědi opoždí duševní vývoj, zhoršuje metabolismus cukrů, ztrátu pigmentu a vypadávání vlasů, porucha tvorby a zhoršení kvality kostí a vaziva a vede k anémii Děti jsou citlivější na přísun mědi Ve vysokých dávkách toxický pro vodní organismy Součástí fungicidů, algicidů a dalších přípravků proti virům a bakteriím
Kyanidy CN^-	Rostliny produkující kyanogenní glykosidy Některé řasy a bakterie produkují kyanid	Odpadní vody z povrchové úpravy kovu, tepelné úpravy kovů a z fotografického průmyslu Tepelné zpracování uhlí Výroby karbidu vápenatého Protispěkáci látky v posypové soli Odpady při biosyntézách		Díky vazbě na dýchací enzymy je nebezpečný pro všechny organismy dýchající kyslík Při nízkých dávkách se objevuje nevolnost bolest hlavy, únava Při vysokých nastává koma a smrt Chronická expozice vede k hluchotě, šerosleposti nebo k poruchám chůze Otrava může nastat kontaktně přes pokožku Vysoce toxický ve vodním prostředí

Tabulka 4 Charakteristika vybraných iontů IV. (Křížkova et al. 2009; Pitter 2009; Petrlík et al. 2010; Housecroft a Sharpe 2014)

Iont	Přírodní zdroje	Antropogenní zdroje	Kladné vlastnosti	Negativní vlastnosti
Barnatý Ba^{+II}	V minerálech: witherit a baryt	Odpadní vody při výrobě keramiky, skla, papíru a televizních obrazovek Součástí kalících zařízení, aditiv do paliva, fungicidů a akaricidů Uvolňován při spalování tuhých paliv a ropy	V malých dávkách působí jako svalový stimulant Bývá řazen k esenciálním prvkům	Ve vysokých dávkách neurotoxický Poškozuje kardiovaskulární systém, způsobuje třes, slabost a paralýzu Při vdechování poškozuje horní i dolní cesty dýchací Chronická otrava se projevuje slabostí, hubnutím, záněty ústní sliznice, průjmý, hypertenzí, vypadáváním vlasů a zánětem spojivek
Amonný NH_4^+	V minerále struvit Primárním rozkladem organických dusíkatých látek	Splaškové odpadní vody Odpadní vody ze zemědělské výroby, z tepelného zpracování uhlí, z galvanického pokovování Kalová voda Hnojiva s obsahem dusíku Hygienické zabezpečení vody tzv. chloraminace	Základem výživy rostlin	V nízkých koncentracích dráždí dýchací cesty Při vysokých dochází k zánětům očí, plic, kůže Dlouhodobé působení vede k chronickým onemocněním dýchacích cest a očí, jako je zelený zákal a onemocnění rohovky Vysoce toxický pro vodní organismy
Zinečnatý Zn^{+II}	V rudách sfalerit a smithosonit Běžnou součástí hornin, půd a sedimentů	Spalováním fosilních paliv Zpracováním neželezných rud Odpadní vody z moření mosazi, z výroby elektrotechniky, ze zpracování rud Pozinkované materiály Hnojiva s obsahem zinku	Součástí enzymů Podporuje imunitní systém Esenciální prvek	Nedostatek vede k růstovým poruchám, k potratům nebo poškození plodu Nadbytek má za následky poruchy trávicí soustavy tzv. nemoc slévačů Dlouhodobé nadužívání způsobuje anémii a poškození slinivky

Tabulka 5 Charakteristika vybraných iontů V. (Křížkova et al. 2009; Pitter 2009; Petrlik et al. 2010; Housecroft a Sharpe 2014)

Iont	Přírodní zdroje	Antropogenní zdroje	Kladné vlastnosti	Negativní vlastnosti
Kadenatý Cd^{+II}	Vyskytuje se v rudách společně se zinkem Uvolňuje se sopečnou činností	Odpadní vody ze zpracování rud, z galvanického pokovování, z výroby akumulátorů Spalováním fosilních paliv, nafty, topných olejů a termoplastů Součástí fosfátových hnojiv a čistírenských kalů		Díky podobnosti se zinkem a dalším esenciálním kovům snadno proniká a poškozuje zasažený organismus Poškozuje ledviny, kostní tkáň, imunitní a kardiovaskulární systém Narušuje metabolismus ostatních kovů Pro lidi je karcinogenní s teratogenními účinky
Arsenitany a Arseničnany AsO_3^{-III} a AsO_4^{-III}	V sulfidických rudách: arsenopyrit, realgar a auripigment Bakteriální oxidací minerálů arsenu: <i>Ferrobacillus</i> , <i>Ferrooxidans</i> Vulkanickou činností	Spalováním fosilních paliv Hutní, koželužny a rudný průmysl Odpadní vody z čistíren a důlních vod Součástí barev na sklo a pesticidů Výroba křišťálu		Chronická expozice vede k tvorbě ekzému, alergií, k výšnému výskytu cévních chorob a potratů Nervový kumulativní jed, smrtelná dávka činí přibližně 130 mg Arsenitany jsou 5× až 20× toxičtější než arseničnany Mutagenní a karcinogenní
Bismutitý Bi^{+III}	V minerálech: bismutin a bismut	Odpady ze sklářského a keramického průmyslu Součástí bezolovnatých pájek a sportovního střeliva		Po požití dochází k poleptání a zánětům sliznice, k zažívacím problémům, k poškození ledvinových kanálků a jater Kumuluje se v nervové soustavě, v buňkách nechráněných hematoencefalitickou bariérou, v ledvinách, játrech, slezině a plicích Způsobuje poruchy endokrinního a imunitního systému Pro rostliny je vysoce toxický Bismutová linie-tmavě fialový lem zubů Podezření na encefalopatii

Tabulka 6 Chemické ukazatele pro pitnou vodu a odpadní vodu z vybraných průmyslových odvětví (Vyhláška č. 252/2004 Sb.; Nařízení vlády č. 401/2015 Sb.)

Chemický ukazatel	Pitná voda			Přípustná hodnota odpadních vod [mg·l ⁻¹]						
	Jednotka	Limit	Typ limitu	Práce s odpady	Výroba hnojiva	Povrchová úprava kovů	Výroba a hutní zpracování kovů	Výroba elektrických zařízení	Výroba nekovových výrobků	Výroba koksu a ropných produktů
N _{Celkový}	–	–	–	–	–	–	–	–	–	25
N–NH ₄ ⁺	mg·l ⁻¹	0,50	MH	–	30	–	15	30	8	20
N–NO ₃ ⁻	mg·l ⁻¹	50	NMH	–	50	–	–	–	–	–
N–NO ₂ ⁻	mg·l ⁻¹	0,50	NMH	–	–	5	–	2	–	–
As	μg·l ⁻¹	10	NMH	0,15	–	0,5	–	0,5	1,5	–
Cr	μg·l ⁻¹	50	NMH	0,5	–	0,5	0,5	0,5	0,3	–
Cd	μg·l ⁻¹	5,0	NMH	0,05	–	–	–	0,2	0,05	0,008
CN ⁻ _{Celkový}	mg·l ⁻¹	0,050	NMH	–	–	1	1	1	–	0,1
Cu	μg·l ⁻¹	1000	NMH	0,5	–	1	0,5	0,5	0,3	–
Ni	μg·l ⁻¹	20	NMH	0,5	–	0,8	0,5	0,5	0,5	0,1
Pb	μg·l ⁻¹	10	NMH	0,2	–	0,5	0,5	0,5	1	0,03
Hg	μg·l ⁻¹	1,0	NMH	0,003	–	0,05	0,05	0,05	–	0,001
Ag	μg·l ⁻¹	25	NMH	–	–	0,1	0,1	0,1	–	–
Zn	–	–	–	1,5	–	2	2	2	0,5	–
Ba	–	–	–	–	–	2	–	–	5	–
P _{Celkový}	–	–	–	–	10	3	–	3	–	–

2.4 Metody stanovení toxických látek

2.4.1 Metody kvalitativní

2.4.1.1 Plynová chromatografie

Plynová chromatografie je jednou z nejpoužívanějších kvalitativních a kvantitativních analytických technik. Žádná jiná metoda analýzy nekombinuje takové rozlišení s rychlostí analýzy a její citlivostí. Používá se v průmyslových, biomedicínských a forenzních laboratořích, zejména při analýze plynných a těkavých látek, které lze bez zahřívání převést do plynného skupenství, ale i pevných látek s bodem varu do cca 400 °C (Zachař a Sýkora 2019).

Metoda je založena na rozdělení složek do dvou fází, mobilní fáze a stacionární fáze. V plynové chromatografii je mobilní fází plyn, tzv. nosný plyn (Skoog et al. 2019). Pevná fáze je v chromatografické koloně, náplň v kolonách je buď pevná látka nebo vysokovroucí kapalina nanášená v tenkých vrstvách na inertní nosič.

Princip separace v plynové chromatografii je následující. Nosný plyn proudí kolonou. Vzorek je zaveden do vyhřívané vstříkovací komory bloku, kde se odpaří a je dopraven nosným plynem ve formě pár. Složky vzorku jsou adsorbovány v pevné fázi na začátku kolony a poté desorbovány na opačném konci kolony s nosným plynem. Nosný plyn postupně dopravuje složky vzorku, tzv. efluent, až na konec kolony, kde jsou v detektoru analyzovány jednotlivé složky nosného plynu. (Skoog et al. 2019)

Složky se vyhodnocují na základě rychlosti, jakou projdou skrz stacionární fázi v koloně. Rychlost je závislá na distribuční konstantě (K_D) složky (Zachař a Sýkora 2019):

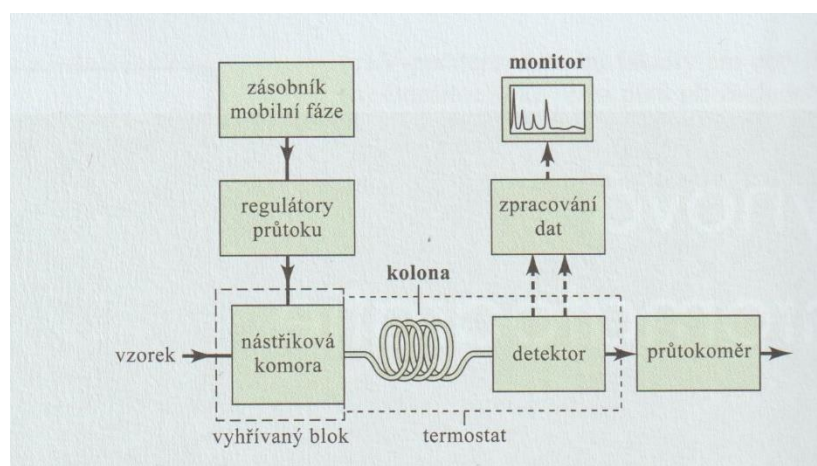
$$K_D = c_s/c_m$$

Kde:

c_s : rovnovážná koncentrace složky ve stacionární fázi

c_m : rovnovážná koncentrace složky v mobilní fázi

Látky postupně opouštějí kolonu ve vzestupném pořadí distribučních konstant a vstupují do detektoru (Skoog et al. 2019). V detektoru se detekují okamžité koncentrace separovaných látek v nosném plynu. Výsledné grafické znázornění časové závislosti signálu detektoru se nazývá chromatogram.



Obrázek 1 Blokové schéma typického plynového chromatografu (Skoog et al., 2019)

2.4.1.1.1 Plamenově ionizační detektor

FID se nejčastěji používá v plynové chromatografii. Efluent je veden z kolony do vodíkového plamene v aerobním prostředí. Nad plamenem je umístěna elektroda, mezi kterou je přivedeno napětí několik stovek voltů. Elektrony a ionty generované pyrolýzou zprostředkovávají vedení elektrického proudu mezi hořákem a sběrnou elektrodou. Citlivý ampérmetr měří proud o velikosti cca 10^{-12} A (Skoog et al. 2019).

2.4.1.1.2 Tepelně vodivostní detektor

TCD je jedním z prvních detektorů plynové chromatografie. Skládá se z vyhřívavého zdroje, jako je tenký platinový, zlatý nebo wolframový drát (Skoog et al. 2019), jehož teplota závisí na tepelné vodivosti prostředí při konstantním výkonu. Tepelná vodivost většiny organických látek je nižší než u nosného plynu, takže i malá množství organické hmoty vykazují velké poklesy.

2.4.1.1.3 Detektor elektronového záchytu

ECD jsou nejpoužívanější pro analýzu vzorků životního prostředí, poskytují selektivní odezvu na halogenové organické látky používané v pesticidech a polychlorovaných bifenylech. Efluent je veden v detektoru kolem β -zářiče (Skoog et al. 2019), jenž ionizuje nosný plyn. To způsobí uvolnění velkého množství elektronu, vznikne konstantní elektrický proud mezi dvojicí elektrod v detektoru. Hodnotu proudu výrazně snižuje přítomnost organických látek (Skoog et al. 2019).

2.4.1.1.4 Hmotnostně spektrometrický detektor

GC-MS patří mezi nejvšestrannější detektory, kombinuje v sobě hmotnostní spektrometrii, která porovnává hmotnostní a nábojový poměr iontu produkovaného ionizací, a plynovou chromatografií. Kapilární kolony se používají ke snížení průtoku nosného plynu, a aby efluent mohl být přiváděn přímo do ionizační komory. Klíčovým prvkem je pokročilý počítačový

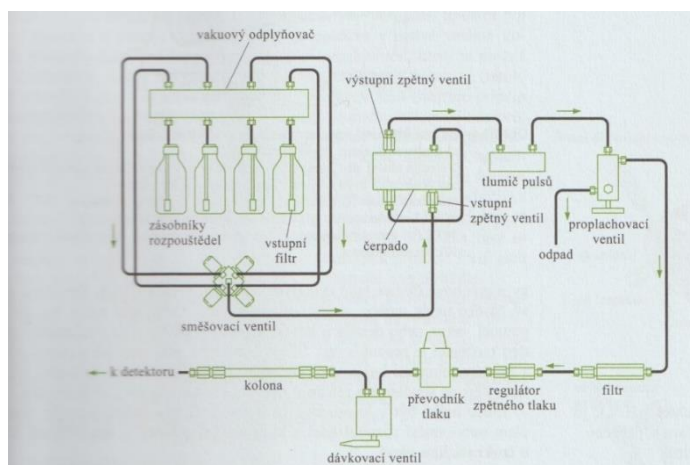
datový systém, který zpracovává 30 000 hmotnostních spekter zaznamenaných během 10 minut měření. (Skoog et al. 2019)

2.4.1.2 Kapalinová chromatografie

HPLC je nejvšestrannější a nejrozšířenější typ eluční chromatografie a používá se pro separaci a stanovení analytů v různých organických, anorganických a biologických materiálech. Díky svým přednostem se stala neocenitelnou metodou v oblasti farmacie, biochemie, environmentalistiky, forenzní, potravinářské a toxikologie (Skoog et al. 2019).

V kapalinové chromatografii je mobilní fází kapalina, do které je dávkován kapalný vzorek obsahující rozpuštěné analyty. Nejmodernější UHPLC zařízení obsahují kolony se stacionární fází o velikostí částic menšími než 2 μm , oproti klasickým HPLC pracují s vyšší účinností, analýza je provedená v jednotkách minut a nabízí výraznou úsporu ve spotřebě rozpouštědel (Skoog et al. 2019).

Schopnost eluovat látky z kolony se nazývá eluční účinnost. Čím rychleji se látka z kolony eluuje, tím vyšší je eluční účinnost mobilní fáze. Rozdíl závisí na vlastnostech analytů a jejich interakci s mobilní a pevnou fází. Dále na typu a vlastnostech pevné fáze, složení mobilní fáze, geometrické parametry kolony, typ dávkovacího zařízení, detektor a připojovací cesty, průtok a provozní teplota (Štuhlík 2004).



Obrázek 4 Blokové schéma typického kapalinového chromatografu (Skoog et al. 2019)

2.4.1.2.1 Rozdělovací chromatografie

Nejčastěji používaný typ HPLC, pevná fáze sestává z kapaliny, která je nemísitelná s kapalnou mobilní fází. Rozdělovací chromatografie se dále dělí na liquid-liquid chromatography a liquid-bonded phase chromatography (Skoog et al. 2019). První uvedená udržuje stacionární fázi fyzikální adsorpcí, druhá je vázána chemickou vazbou. V dnešní době převládá vázaná fáze,

kteřá je stabilnější a lépe kompatibilní s gradientovou elucí, absorbovaná fáze se používá pouze ve speciálních aplikacích.

2.4.1.2.2 Adsorpční chromatografie

Adsorpční chromatografie je klasickou formou kapalinové chromatografie. Jako stacionární fáze se používá výhradně dvou variant, a to silikagelu nebo oxidu hlinitého. Přednostně se používá silikagel před aluminem (Skoog et al. 2019), který umožňuje dávkování většího množství vzorků.

2.4.1.2.3 Iontová chromatografie

První iontové chromatografy k detekci měřily vodivost v kolonách naplněných měničemi aniontů nebo kationtů (Skoog et al. 2019), což nebylo ideální. Postupem času se vyvinuly kolony s nízkou výměnnou kapacitou, to vedlo k používání mobilní fáze s malou iontovou silou, která mohla být dále deionizována. Dnes využíváme dva typy iontové chromatografie s vysoce citlivou vodivostní detekcí. Systém se supresorem, za iontovou výměnnou kolonou následuje supresorová kolona nebo membrána, která převádí ionty v eluentu na neutrální molekuly, a jednokolonový systém, kde jsou ionty analytů separovány na nízkokapacitních iontoměničích.

2.4.1.2.4 Vylučovací chromatografie

Vylučovací nebo gelová chromatografie je vhodná pro separaci vysokomolekulárních látek. Kolona je naplněna částicemi s uniformními póry, do kterých molekuly analytu a rozpouštědla difundují. Doba, kterou molekula stráví uvnitř póru je závislá na velikosti a tvaru. Molekuly větší, než póry nejsou vůbec zadržovány a putují kolonou rychlostí mobilní fáze. Molekuly výrazně menší, než póry snadno pronikají do labyrintem pórů a jsou zadržovány nejdelší dobu, tzn. eluují jako poslední. Molekuly střední velikosti frakcionují v závislosti na své velikosti a tvaru. Od ostatních chromatografických procesů se odlišuje absencí chemických a fyzikálních interakcí analytu se stacionární fází (Skoog et al. 2019).

2.4.1.2.5 Afinitní chromatografie

Afinitní chromatografie je neobyčejně selektivní a využívá se pro rychlou izolaci biomolekul. Využívá se afinitního ligandu na pevném nosiči, který se selektivně a reverzibilně váže na molekuly analytů přítomných ve vzorku, např. protilátky, inhibitory enzymů. Po průchodu neinteragujících molekul se zadržované analyty vymývají změnou složení mobilní fáze, často se využívá pouze úpravy pH nebo iontové síly (Skoog et al., 2019).

2.4.1.3 Iontová analýza

Cílem je detekovat přítomnost nebo nepřítomnost vybraných iontů ve vzorku. K detekci používáme především reakce, které jsou doprovázené výraznou barevnou změnou (Bartoš et al. 2019), vznikem sraženiny nebo nějaký jiný specifický produkt, např. páchnoucí amoniak. Množství vzorků nám umožňuje volit mezi zkumavkovou reakcí, pro kterou máme dostatečné

množství vzorku, nebo kapací reakcí, kdy se na tečkovací destičku nebo filtrační papír nanese malé množství reagensů a analytu. Pokud je vzorků obzvláště málo nebo důkazy jsou viditelné pouze pod mikroskopem provádíme mikroskopickou reakci na podložním sklíčku.

Důkazové činidla rozdělujeme do 3 skupin v závislosti na typu reakce, a to na skupinová činidla, která reagují s celou iontovou skupinou, selektivní činidla, která reagují pouze s určitými ionty, a specifická činidla, která jsou pro každý iont jedinečná.

Kvalitativní analýza je následující: Nejprve se snažíme získat co nejvíce informací o prostředí, ve kterém odběr vzorků probíhá. Popis vzorku, např. jeho barva, složení, vůně atd. Orientační zkoušky, např. plamenovou zkouškou, dále je to rozpouštění pevných vzorků, mokrou po příklad suchou cestou. Nakonec důkazovými činidly zjišťujeme přítomnost jednotlivých kationtů a aniontů.

2.4.2 Metody kvantitativní

2.4.2.1 Volumetrie

Titrace je běžná laboratorní metoda pro stanovení množství konkrétní látky (analytu) ve vzorku. Během titrace se titrační činidlo postupně přidává ke známému množství vzorku, dokud není reakce mezi ním a zkoušenou látkou dokončena, tzn. nedojde k bodu ekvivalence. Z množství použitého titračního činidla se známou (přesnou) koncentrací můžeme vypočítat koncentraci nebo množství analyzované látky. Pomocí byrety odměříme přesné množství přidaného titračního činidla (Bartoš et al. 2018). Volumetrie je vhodná pro stanovování látek o koncentracích větších než $10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$. (Opekar et al. 2010)

K zjištění bodu ekvivalence využíváme instrumenty měřící fyzikální vlastnosti roztoku, viz tabulka 7, nebo chemické indikátory, které působí barevného přechodu při dosažení určitého pH, viz tabulka 8.

Tabulka 7 Instrumentální indikátory

Název	Přístroj	Fyzikální veličina
Potenciometrie	Potenciometr pH metr	napětí pH
Konduktometrie	Konduktometr	vodivost
Voltametrie	voltmetr	proud
Coulometrie	coulometr	náboj

Tabulka 8 Nejčastěji používané acidobazické indikátory (Skoog et al. 2019)

Název	Typ indikátoru	pK _a	Rozmezí pH barevného přechodu	Zbarvení	
				nižší pH	vyšší pH
thylová modř-první přechod	H ₂ Ind	1,65	1,2-2,8	červené	žluté
methylová žlut'	Ind	3,30	2,9-4,0	červené	žluté
methylooranž	Ind	3,46	3,1-4,4	červené	žluté
bromkresolová zeleň	HInd	4,66	3,8-5,4	žluté	modré
methylčerveň	Ind	4,95	4,2-6,3	červené	žluté
bromkresolový purpur	HInd	6,12	5,2-6,8	žluté	purpurové
bromthymolová modř	HInd	7,10	6,2-7,6	žluté	modré
fenolová červeň	hInd	7,81	6,8-8,4	žluté	červené
thymolová modř-druhý přechod	hInd	8,96	8,0-9,6	žluté	modré
fenolftalein	hInd	9,40	8,3-10,0	bezbarvé	purpurové
thymolftalein	HInd	10,00	9,3-10,5	bezbarvé	modré
alizarinová žlut' GG	Ind	11,16	10,0-12,0	bezbarvé	žluté

2.4.2.1.1 Metoda neutralizační

Neutralizační titrace se běžně používá ke stanovení kyselých nebo zásaditých analytů a také analytů, které lze pohodlně převést na kyselé nebo zásadité. Nejčastěji používaným rozpouštědlem při neutralizační titraci je voda, protože se s ní snadno manipuluje, je nenákladná a je snadno dostupná. Jiná vhodná rozpouštědla, jako je koncentrovaná kyselina octová, se používají pro analyty, které jsou buď ve vodě nerozpustné, nebo nevykazují v tomto médiu požadované acidobazické chování. (Skoog et al. 2019)

Neutralizační titrace dále rozdělujeme na acidimetrii, ve kterých je kyselina titračním činidlem, a alkalimetrii, kde je titračním činidlem zásada.

2.4.2.1.2 Metoda oxidačně-redukční

Při oxidačně-redukčních titracích dochází k přenosu elektronů mezi analytem a titračním činidlem přímo v roztoku. Velkou výhodou těchto stanovení je vysoká selektivita, není potřeba oddělovat zbývající složky vzorku při vhodném výběru titračního činidla (Skoog et al. 2019).

Na základě použitých titračních činidel rozdělujeme redoxní titrace na manganometrii, bromatometrii, jodometrii, titanometrii, chromatometrii a chromometrii.

2.4.2.1.3 Metoda komplexotvorná

Komplexotvorné titrace zahrnují tvorbu komplexu mezi analytem, kterým je obvykle kovový iont, a titračním činidlem, což je roztok vhodného ligandu. Konec titrace se stanoví změnou barvy odpovídajícího indikátoru nebo zvolenou instrumentální metodou.

Během chelatometrických titrací vznikají rozpustné stabilní cheláty, což jsou komplexní cyklické sloučeniny.

2.4.2.1.4 Metoda srážecí

Srážecí titrace se v analytice využívá k reakcím založených na rekombinaci iontů stejně jako komplexotvorné, tzn. komplexotvorné a srážecí reakce jsou tedy obdobné a navzájem provázané (Skoog et al. 2019).

Srážecí titrace rozdělujeme na argentometrické a merkurimetrické.

2.4.2.2 Gravimetrie

Vázková analýza je založena na kvantitativním vyloučení specifické složky jako těžko rozpustné sloučeniny, která se po vysušení nebo žíháním stává chemicky definovaným produktem, určeného k vážení. Vzniklá sraženina se nazývá vyloučená forma, přesně definovaný produkt získaný po sušení nebo žíhání se nazývá vyvážka a z její hmotnosti se vypočítává množství nebo koncentrace konkrétní složky (Bartoš et al. 2018).

Jako jedna z nejspolehlivějších analytických metod hraje gravimetrie důležitou roli v kontrolních a srovnávacích analýzách, validaci nových analytických metod a analýze standardů. Gravimetrie je vhodná pro stanovení látek o koncentraci vyšší než $10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ (Opekar et al. 2010). Patří mezi definované metody, tedy metody, u kterých je výsledek přímo vztažen k jedné ze základních jednotek SI.

Zvážíme vzorek, který má být analyzován, rozpustíme ho v roztoku a přidáním srážedla vyloučíme stanovené složky. Necháme sraženinu sediment vyžrát a poté jí oddělíte od matečného roztoku filtrací. K filtraci používáme papírové filtry, porcelánové filtrační kelímky nebo skleněné frity (Herchel 2011). Sraženina musí být zbaven zbytků matečného roztoku a rozpustných látek, které je nutné vymýt vhodným elektrolytem. Přefiltrovaná a promytá sraženina se nechá vyschnout, zbaví se všech těkavých kapalin při teplotách nad bodem varu, nebo jí zahřejte v porcelánovém, křemenném nebo platinovém kelímku při teplotě 400 až 1200 °C (Kříženecká a Synek 2014).

Množství stanovené látky se vypočte z navážky vzorku, z hmotnosti vyžíhaného vzorku a pomocí gravimetrického faktoru (f_g) (Kříženecká a Synek 2014).

$$w_s = m_v m_n \cdot f_g \cdot 100$$

Kde:

- m_v : hmotnost vyvážky
- m_n : hmotnost navážky
- f_g : gravimetrický faktor, poměr molární hmotnosti hledané látky ku molární hmotnosti izolované látky

3 Cíle práce

Cílem mé bakalářské práce bylo pilotně ověřit sérii důkazových reakcí, vhodných k analýze vybraných toxických iontů na filtračním papíře. Dále jsem se snažil sestrojít mikrofluidní zařízení schopné detekovat vybrané toxické ionty.

4 Materiály a metody

4.1 Pomůcky

Při ověřování důkazových reakcí jsem pracoval s filtračním papírem, automatickou pipetou, fénem, laboratorní lžičkou.

Na výrobu mikrofluidních zařízení jsem používal navíc oboustranně lepící pásku, laminovací fólii, žehličku, nůžky a pečicí papír.

4.2 Přístroje

Během práce jsem používal přístroj:

- Vosková tiskárna Xerox ColorQube 8580

4.3 Chemikálie

Při práci jsem používal tyto chemikálie:

- α -Naftol
- Čugajevovo činidlo (1 % ethanolový roztok diacetyldioximu)
- Difenyلكarbazid
- Difenylamin
- Dichroman draselný
- Dusičnan barnatý
- Dusičnan bismutitý
- Dusičnan olovnatý
- Dusičnan rtuťnatý
- Dusičnan rtuťný
- Dusičnan stříbrný
- Dusitan sodný
- Hexakynoželezitan draselný
- Hexakynoželezitan draselný
- Hydrogenfosforečnan sodný
- Hydroxid amonný
- Hydroxid sodný
- Chlorid kademnatý
- Chlorid železitý

- Chroman draselný
- Jodid draselný
- Kyanid draselný
- Kyselina dusičná
- Kyselina sírová
- Nesslerovo činidlo (tetrajodortuťnatan draselný)
- Octan sodný
- Síran mědnatý
- Síran nikelnatý
- Síran zinečnatý
- Sulfanilová kyselina
- Sulfid sodný
- Trichlormetan
- Uhličitan sodný

4.4 Důkazové reakce

4.4.1 Rtuťné ionty

- Sulfidy dávají černou sraženinu, která je směsí HgS a Hg (Okáč 1956; Kučková 2006).
- Uhličitan sodný dává špinavě žlutou sraženinu, zvolna černající vyloučenou rtuti (Okáč, 1956; Kučková 2006).
- Jodid draselný sráží žlutozelený jodid rtuťný (Okáč 1956).
- Chroman draselný dává červenohnědou amorfni sraženinu (Okáč 1956; Kučková 2006).

4.4.2 Rtuťnaté ionty

- Jodid draselný dává červenou sraženinu HgI₂ (Okáč 1956).
- Chroman draselný sráží červenohnědou sraženinu HgCrO₄ (Okáč 1956).
- Difenyلكarbazid dává v prostředí kyseliny dusičné s ionty rtuti modrofialové zbarvení. (Kučková 2006).

4.4.3 Kademnaté ionty

- Difenyلكarbazid dává s kademnatými ionty červenofialové zbarvení (Okáč 1946).
- Difenyلكarbazid dává v prostředí octanu sodného s kademnatými ionty fialové zbarvení (Kučková 2006).
- Sulfidy sráží z mírně kyselých roztoků žlutý CdS (Okáč 1946; Kučková 2006).

4.4.4 Olovnaté ionty

- Chroman draselný, dichroman draselný (Okáč 1956), dává žlutou sraženinu chromanu olovnatého (Kučková 2006).
- Jodid draselný sráží žlutý PbI_2 (Okáč 1956; Kučková 2006).
- Sulfidy sráží ze slabě kyselého prostředí černý sulfid olovnatý (Okáč 1956; Kučková 2006).

4.4.5 Arsenitanové ionty

- Síran měďnatý dává papouškově zelenou sraženinu $CuHAsO_3$ (Okáč 1956).

4.4.6 Arseničnanové ionty

- Dusičnan stříbrný sráží roztoky arseničnanu jako čokoládově hnědou sraženinu (Okáč 1956).

4.4.7 Nikelnaté ionty

- Kyanidy sráží zelený $Ni(CN)_2$ (Okáč 1956; Kučková 2006; Bartoš et al. 2011).
- Čugajevova reakce s dimethylglyoximem poskytuje v amoniakálním prostředí červenou sraženinu (Okáč 1946; Kučková 2006; Bartoš et al. 2011).

4.4.8 Barnaté ionty

- Chroman draselný sráží žlutý $BaCrO_4$ (Okáč 1946; Kučková 2006; Bartoš et al. 2011).

4.4.9 Stříbrné ionty

- Jodid draselný sráží žlutý AgI (Okáč 1946; Kučková 2006).
- Sulfidy sráží černý sulfid stříbrný (Kučková, 2006; Bartoš et al. 2011).
- Alkalické hydroxidy dávají hnědou sraženinu Ag_2O (Kučková 2006).
- Chroman draselný a dichroman draselný sráží červenohnědý chroman stříbrný (Okáč 1956; Kučková 2006).
- Uhličitan sodný sráží nažloutlý Ag_2CO_3 (Okáč 1946; Kučková 2006).
- Hexakynoželezitan draselný sráží stříbrné ionty na červenohnědou sraženinu (Kučková 2006).

4.4.10 Zinečnaté ionty

- Hexakynoželezitan draselný sráží hnědožlutý $Zn_3[Fe(CN)_6]_2$ (Kučková 2006).

4.4.11 Chromanové ionty

- Dusitan stříbrný sráží červený chroman stříbrný (Kučková 2006; Bartoš et al. 2011).
- Jodid draselný redukuje v kyselém prostředí chroman na zelený chromitý iont (Bartoš et al. 2011).

- Difenylkarbazid reaguje s chromany v kyselém prostředí fialovým roztokem (Okáč 1946).
- Octan olovnatý sráží žlutou sraženinu PbCrO_4 (Okáč 1956).

4.4.12 Dichromanové ionty

- Dusičnan stříbrný sráží červený dichroman stříbrný (Kučková 2006).
- Difenylkarbazid reaguje s dichromany v kyselém prostředí fialovým roztokem (Okáč 1946).

4.4.13 Amonné ionty

- Nesslerovo činidlo $\text{K}_2[\text{HgI}_4]$ poskytuje již s nepatrnými stopami amoniaku žluté zbarvení (Okáč 1946; Kučková 2006).
- S měďný kationtem reaguje za vzniku intenzivně modrého roztoku (Kučková 2006).

4.4.14 Dusitanové ionty

- Diazotací sulfanilovou kyselinou a kopulací α -naftolem vzniká červená skvrna (Okáč 1956)

4.4.15 Dusičnanové ionty

- Roztok difenylaminu v koncentrované kyselině sírové indikuje přítomnost dusičnanů modrým pruhem (Okáč 1956; Bartoš et al. 2011)

4.4.16 Kyanidové ionty

- Sulfid mědnatý se rozpouští v kyanidech a jeho zbarvení mizí (Okáč 1956).
- Nikelnaté ionty sráží zelený $\text{Ni}(\text{CN})_2$ (Okáč 1956; Kučková 2006; Bartoš et al. 2011).

4.4.17 Fosforečnanové ionty

- Dusičnan stříbrný vylučuje žlutý fosforečnan stříbrný (Okáč 1946; Kučková 2006; Bartoš et al. 2011).
- Chlorid železitý slabě nažloutlý fosforečnan železitý (Okáč 1956).

4.4.18 Mědnaté ionty

- Hexakynoželeznatan draselný sráží mědnaté ionty ve formě červenohnědé sraženiny (Kučková 2006; Bartoš et al. 2011).
- Hexakynoželezitan draselný sráží zelenožlutohnědou měďnou sůl (Kučková 2006).
- Hydroxidy dávají světlemodrou sraženinu (Okáč 1956).

4.4.19 Bismutité ionty

- Sulfidy sráží tmavě hnědý Bi_2S_3 (Kučková 2006).
- Jodid draselný sráží černohnědý BiI_3 (Okáč 1946; Kučková 2006).

- Chroman draselný a dichroman draselný sráží žlutý $(\text{BiO})_2\text{CrO}_4$ (Kučková 2006).

Automatickou pipetou jsem nanášel malé množství reagensů na filtrační papír, ten jsem následně vysušil pomocí fěnu. Na zaschlou reagensii jsem přikápl požadovaný iont a pozoroval barevnou změnu. Používal jsem ochranné pomůcky a dbal jsem zvýšené opatrnosti během práce s toxickými kovy. Vzniklé toxické odpady jsem sbíral, aby mohly být zlikvidované pomocí speciální firmy. Barevné přechody jsou uvedené v tabulce 9 k porovnáním s očekávaným.

4.5 Výroba nízkonákladového mikrofluidního zařízení

Výroba nízkonákladového mikrofluidního zařízení vycházela z patentu Petr a kol. (UPOL 2017). Voskovou tiskárnou (Xerox ColorQube) jsem vytiskl vzor čipu na filtrační papír. Papír jsem vložil do pečicího papíru a po dobu půl minuty jsem přejížděl rozžhavenou žehličkou (nastavenou na 200 °C). Voskový inkoust tak prostoupil přes celou tloušťku filtračního papíru. Papír jsem nalepil na oboustranně lepicí pásku a rozstříhal na pět částí. Středovou a okrajové části s komůrkami jsem nalepil na laminovací fólii, aby odpovídaly vytisknutému vzoru. Sací kanálek jsem vyrobil z filtračního papíru a oboustranně lepicí pásky. Papír jsem nalepil na pásku. Odměřil jsem si šířku mezi komůrkami, tak aby kanálek lehce přečníval na obou stranách, a délku od hrany laminovací fólie až po konec nalepeného filtračního papíru. Vystřižené kanálky jsem nalepil.

5 Výsledky a jejich diskuze

5.1 Ověřování důkazových reakcí

Tabulka 9 Barevné přechody důkazových reakcí

Iont	Reagencie	Výsledná barva	Očekávaná barva
Hg ²⁺	Na ₂ S	ŽÁDNÁ	Černá
	Na ₂ CO ₃	ŽÁDNÁ	Žlutá
	KI	Žlutá	Žlutozelená
	K ₂ CrO ₄	Oranžová	Červenohnědá
Hg ⁺	KI	Oranžová	Červená
	K ₂ CrO ₄	Hnědá	Červenohnědá
	(C ₆ H ₅ NHNH) ₂ CO + HNO ₃	Tmavě modrá	Modrofialová
	(C ₆ H ₅ NHNH) ₂ CO + CH ₃ COONa	Vínová	Fialová
Cd ²⁺	(C ₆ H ₅ NHNH) ₂ CO	Fialová	Červenofialová
	Na ₂ S	ŽÁDNÁ	Žlutá
Pb ²⁺	K ₂ CrO ₄ nebo K ₂ Cr ₂ O ₇	Žlutá	Žlutá
	KI	Zlatá	Žlutá
	Na ₂ S	Světle hnědá	Černá
AsO ₃ ^{-III}	CuSO ₄		Zelená
AsO ₄ ^{-III}	AgNO ₃		Čokoládově hnědá
Ni ²⁺	KCN	ŽÁDNÁ	Zelená
	C ₄ H ₈ N ₂ O ₂	Růžová	Červená
Ba ²⁺	K ₂ CrO ₄	Světle žlutá	Žlutá
Ag ⁺	KI	ŽÁDNÁ	Žlutá
	Na ₂ S	Světle hnědá	Černá
	NaOH	Černohnědá	Hnědá
	K ₂ CrO ₄ nebo K ₂ Cr ₂ O ₇	Červenohnědá	Červenohnědá
	NaCO ₃	ŽÁDNÁ	Nažloutlá
	K ₃ [Fe(CN) ₆]	Hnědožlutá	Červenohnědá
	K ₃ [Fe(CN) ₆]	Světle oranžová	Hnědožlutá
Zn ²⁺	AgNO ₃	Červenohnědá	Červená
	KI	ŽÁDNÁ	Zelená
	(C ₆ H ₅ NHNH) ₂ CO	Hnědá	Fialová
	Pb(NO ₃) ₂	Žlutá	Žlutá
Cr ₂ O ₇ ^{+II}	AgNO ₃	Červenohnědá	Červená
	(C ₆ H ₅ NHNH) ₂ CO	Hnědá	Fialová
	K ₂ [HgI ₄]	ŽÁDNÁ	Žlutá
NH ₄ ⁺	CuSO ₄	Světle modrá	Modrá
	C ₆ H ₇ NO ₃ S + C ₁₀ H ₇ OH	Červená	Červená
NO ₂ ⁻	C ₁₂ H ₁₁ N+H ₂ SO ₄	Modrá	Modrá
NO ₃ ⁻	CuSO ₄ + NH ₄ OH	Vybělí	Bezbarvá
CN ⁻	NiSO ₄	ŽÁDNÁ	Zelená
	AgNO ₃	Tmavě žlutá	Žlutá
	FeCl ₃	Vybělí	Nažloutlá
PO ₄ ^{-III}	K ₄ [Fe(CN) ₆]	Červenohnědá	Červenohnědá
	K ₃ [Fe(CN) ₆]	ŽÁDNÁ	Zelenožlutá
	NH ₄ OH	ŽÁDNÁ	Světlemodrá
Bi ^{+III}	Na ₂ S	ŽÁDNÁ	Hnědá
	KI	Černá	Černohnědá
	K ₂ CrO ₄ nebo K ₂ Cr ₂ O ₇	Světle modrá	Žlutá

Na obrázcích 3-31 jsou konečné barevné přechody provedené na filtračním papíru. Uvádím pouze úspěšné barevné přechody. Difenylamin je vhodný k detekci dusičnanů obrázek 27, ale součástí reagensie je koncentrovaná kyselina sírová, která rychle rozleptá filtrační papír.

- Hg_2^{+II}

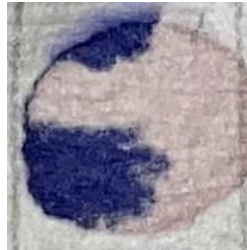


Obrázek 9 Indikace jodidem draselným

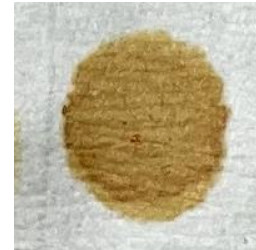


Obrázek 7 Indikace chromanem draselným

- Hg^{+II}



Obrázek 15 Indikace difenylkarbazidem v kyselině dusičné

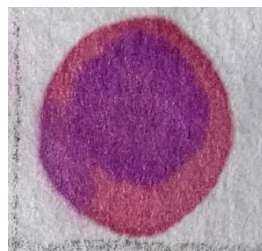


Obrázek 12 Indikace chromanem draselným



Obrázek 18 Indikace jodidem draselným

- Cd^{+II}



Obrázek 21 Indikace difenylkarbazidem v prostředí octanu sodného



Obrázek 24 Indikace difenylkarbazidem

- Pb^{+II}



Obrázek 30 Indikace
jodidem draselným



Obrázek 27 Indikace
chromanem draselným



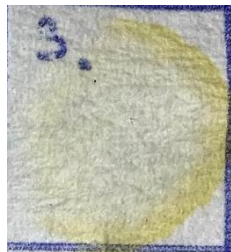
Obrázek 33 Indikace
sulfanem sodným

- Ni^{+II}



Obrázek 36 Indikace
dimethylglyoximem

- Ba^{+II}



Obrázek 39 Indikace
chromanem draselným

- Ag^+



Obrázek 45 Indikace
hexakynoželezitanem
draselným



Obrázek 42 Indikace
chromanem draselným



Obrázek 48 Indikace
hydroxidem sodným



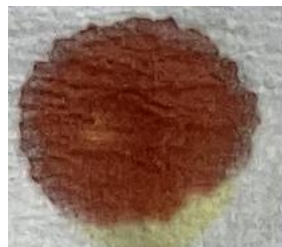
Obrázek 51 Indikace
sulfanem sodným

- Zn^{+II}

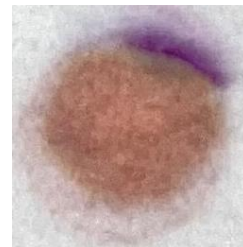


Obrázek 54 Indikace
hexakynoželezitanem
draselným

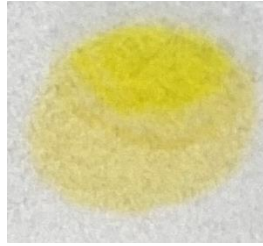
- CrO_4^{-II}



Obrázek 57 Indikace
dusičnanem stříbrným



Obrázek 60 Indikace
difenylkarbazidem



Obrázek 63 Indikace
dusičnanem olovnatým

- $\text{Cr}_2\text{O}_7^{+II}$



Obrázek 69 Indikace
difenylkarbazidem



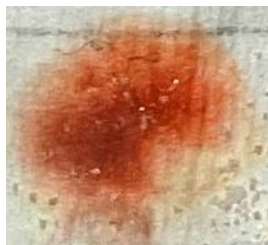
Obrázek 66 Indikace
dusičnanem stříbrným

- NH_4^+



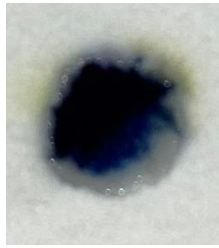
Obrázek 72 Indikace
síranem mědnatým

- NO_2^-



Obrázek 75 Indikace α -
naftolem a sulfanilovou
kyselinou

- NO_3^-



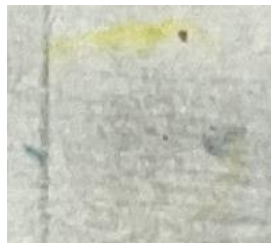
Obrázek 78 Indikace
difenylaminem

- CN^-

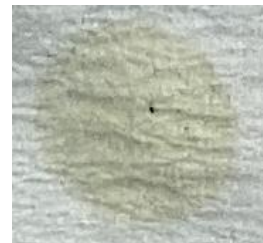


Obrázek 81 Indikace
síranem měďnatým a
hydroxidem amonným

- PO_4^{3-}

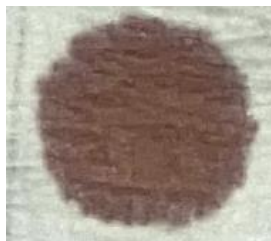


Obrázek 87 Indikace
chloridem železitým



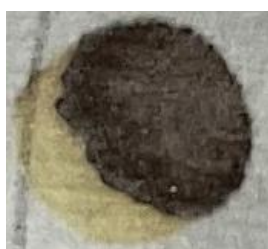
Obrázek 84 Indikace
dusičnanem stříbrným

- Cu^{2+}



Obrázek 90 Indikace
hexakynoželeznatanem
draselným

- $\text{Bi}^{+\text{III}}$



Obrázek 95 Indikace jodidem draselným



Obrázek 93 Indikace chromanem draselným

Na základě barevných změn reagensů s ionty jsem některé reagensy vybral a provedl křížový test, který mi ukázal, jestli některá reagensie nepůsobí stejným způsobem na více iontu nebo jestli se nedá využít pro detekci jiného iontu. Reagensie jsem vybíral na základě barevné reakce, citlivosti a jednoduchosti provedení. Výsledné barevné přechody jsou uvedeny v tabulkách 10-13.

Tabulka 10 Křížové reakce iontů s vybranými reagensiemi I.

Reagensie	$\text{Hg}_2^{+\text{II}}$	$\text{Hg}^{+\text{II}}$	$\text{Cd}^{+\text{II}}$	$\text{Pb}^{+\text{II}}$	$\text{AsO}_3^{-\text{III}}$
AgNO_3	–	–	–	–	
CuSO_4	–	–	–	–	
$\text{CuSO}_4 + \text{NH}_4\text{OH}$	–	–	–	–	
Na_2CO_3	–	–	–	–	
KI	Žlutá	Oranžová	–	Zlatá	
$(\text{C}_6\text{H}_5\text{NHNH})_2\text{CO} + \text{HNO}_3$	Tmavě modrá	Tmavě modrá	Vybělil	Fialová	
$(\text{C}_6\text{H}_5\text{NHNH})_2\text{CO} + \text{CH}_3\text{COONa}$	Tmavě modrá	Tmavě modrá	Vínová	Fialová	
$(\text{C}_6\text{H}_5\text{NHNH})_2\text{CO}$	Tmavě modrá	Tmavě modrá	Fialová	Fialová	
K_2CrO_4	Oranžová	Hnědá	–	Žlutá	
$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	Oranžová	Hnědá	–	–	
$\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_2$	–	–	–	–	
Na_2S	Šedohnědá	–	–	Světle hnědá	
$\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$	Světle modrá	Světle modrá	–	–	
$\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$	Světle modrá	–	Světle oranžová	–	
$\text{K}_2[\text{HgI}_4]$	Tmavě hnědá	Hnědá	–	–	
$\text{C}_6\text{H}_7\text{NO}_3\text{S} + \text{C}_{10}\text{H}_7\text{OH}$	–	–	–	–	
FeCl_3	–	–	–	–	
NH_4OH	–	–	–	–	

Tabulka 11 Křížové reakce iontů s vybranými reagensy II.

Reagens	AsO ₄ ^{III}	Ni ^{II}	Ba ^{II}	Ag ⁺	Zn ^{II}
AgNO ₃	–	–	–	–	–
CuSO ₄	–	–	–	–	–
CuSO ₄ +NH ₄ OH	–	–	–	–	–
Na ₂ CO ₃	–	–	–	–	–
KI	–	–	–	–	–
(C ₆ H ₅ NHNH) ₂ CO + HNO ₃	Fialová	–	–	Šedá	Vybělí
(C ₆ H ₅ NHNH) ₂ CO + CH ₃ COONa	Fialová	–	–	Černá	Vínová
(C ₆ H ₅ NHNH) ₂ CO K ₂ CrO ₄	Fialová	–	Světle žlutá	Grafitová Hnědočervená	Fialová –
K ₂ Cr ₂ O ₇	–	–	Světle oranžová	Hnědočervená	–
C ₄ H ₈ N ₂ O ₂	Růžová	–	–	–	–
Na ₂ S	–	–	–	Světle hnědá	–
K ₄ [Fe(CN) ₆]	–	–	–	–	–
K ₃ [Fe(CN) ₆]	–	–	–	Hnědožlutá	Světle oranžová
K ₂ [HgI ₄]	Světle modrá	–	–	Hnědá	–
C ₆ H ₇ NO ₃ S + C ₁₀ H ₇ OH	–	–	–	Šedá	–
FeCl ₃	–	–	–	–	–
NH ₄ OH	–	–	–	–	–

Tabulka 12 Křížové reakce iontů s vybranými reagensy III.

Reagencie	CrO_4^{II}	$\text{Cr}_2\text{O}_7^{\text{II}}$	NH_4^+	NO_2^-	NO_3^-
AgNO_3	Červenohnědá	Červenohnědá	–	–	–
CuSO_4	–	–	Světle modrá	–	–
$\text{CuSO}_4 + \text{NH}_4\text{OH}$	–	–	–	–	–
Na_2CO_3	–	–	–	–	–
KI	–	–	–	Světle žlutá	–
$(\text{C}_6\text{H}_5\text{NHNH})_2\text{CO} + \text{HNO}_3$	Žlutá	Hnědá	Vybělí	–	–
$(\text{C}_6\text{H}_5\text{NHNH})_2\text{CO} + \text{CH}_3\text{COONa}$	Hnědá	Hnědá	Světle růžová	–	–
$(\text{C}_6\text{H}_5\text{NHNH})_2\text{CO}$	Hnědá	Červenofialová	–	–	–
K_2CrO_4	–	–	–	–	–
$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	–	–	–	–	–
$\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_2$	–	–	–	–	–
Na_2S	–	–	–	–	–
$\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$	–	–	–	–	–
$\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$	–	–	–	–	–
$\text{K}_2[\text{HgI}_4]$	–	–	–	–	–
$\text{C}_6\text{H}_7\text{NO}_5\text{S} + \text{C}_{10}\text{H}_7\text{OH}$	–	–	–	Červená	–
FeCl_3	–	–	Světle hnědá	–	Vybělí
NH_4OH	–	–	–	–	–

Tabulka 13 Křížové reakce iontů s vybranými reagensy IV.

Reagencie	CN ⁻	PO ₄ ³⁻	Cu ²⁺	Bi ³⁺
AgNO ₃	–	Tmavě žlutá	–	–
CuSO ₄	–	–	–	–
CuSO ₄ +NH ₄ OH	Vybělí	–	–	–
Na ₂ CO ₃	–	–	–	–
KI	–	–	Světe žlutý okraj	Černá
(C ₆ H ₅ NHNH) ₂ CO + HNO ₃	–	–	–	–
(C ₆ H ₅ NHNH) ₂ CO + CH ₃ COONa	–	–	Černá	–
(C ₆ H ₅ NHNH) ₂ CO	Růžovo- červená	–	–	Hnědá
K ₂ CrO ₄	–	–	–	Světle modrá
K ₂ Cr ₂ O ₇	–	–	–	Světle modrá
C ₄ H ₈ N ₂ O ₂	–	–	Světle zelený	–
Na ₂ S	–	–	–	–
K ₄ [Fe(CN) ₆]	–	–	Červeno- hnědá	–
K ₃ [Fe(CN) ₆]	–	–	–	–
K ₂ [HgI ₄]	–	–	Modrá	Hnědá
C ₆ H ₇ NO ₃ S + C ₁₀ H ₇ OH	–	–	–	–
FeCl ₃	–	Vybělí	–	–
NH ₄ OH	–	–	–	–

Na základě barevných změn během reakcí uvedených v tabulkách 10-13, jsem vybral jako jednotlivé reagensy tyto chemikálie nebo směsi chemikálií:

- Difenyلكarbazid
- Difenyلكarbazid a kyselina dusičná
- Difenyلكarbazid a octan sodný
- Dichroman draselný
- Dimethylglyoxim (Čugajevovo činidlo)
- Dusičnan stříbrný
- Hexakynoželezitan draselný
- Hexakynoželezitan draselný
- Chlorid železitý
- Chroman draselný
- Jodid draselný
- Síran mědnatý
- Síran mědnatý a hydroxid amonný

- Sulfanilová kyselina a α -naftol (Diazotace-kopulace)
- Tetrajodortuťnatan draselný (Nesslerovo činidlo)

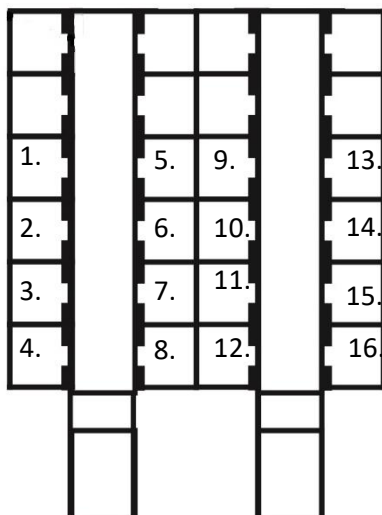
5.2 Optimalizace mikrofluidního zařízení

Na vyrobené mikrofluidní zařízení jsem nanesl vybrané chemikálie, jak je naznačeno na obrázku 34, v množství:

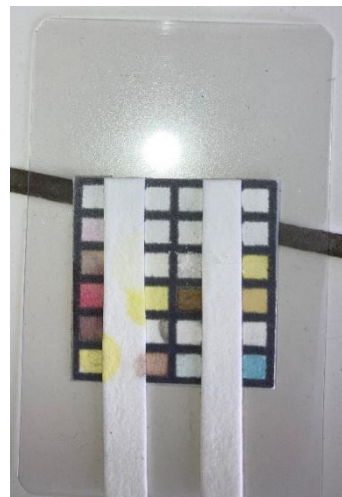
1. 150 μ l difenylkarbazidu a 150 μ l kyseliny dusičné
2. 150 μ l difenylkarbazidu a 150 μ l octanu sodného
3. 150 μ l difenylkarbazidu
4. 250 μ l chloridu železitého
5. 250 μ l hexakynoželeznanu draselného
6. 250 μ l hexakynoželezitanu draselného
7. 250 μ l jodidu draselného
8. 250 μ l dusičnanu stříbrného
9. 150 μ l α -naftolu
10. 150 μ l tetrajodortuťnatanu draselného
11. 40 μ l dimethylglyoximu
12. 250 μ l síranu měďnatého
13. 250 μ l chromanu draselného
14. 250 μ l dichromanu draselného
15. jsem nechal čistou
16. 150 μ l síranu měďnatého a 150 μ l hydroxidu amonného

Zařízení jsem následně vysušil fénem. K α -naftolu jsem přidal na špičce laboratorní lžičky sulfanilovou kyselinu a vtlačil jí do filtračního papíru. Vytvořený papírový test je na obrázku 35.

Papírové testy jsem podstoupil zkoušce, zdali jsou schopné indikace. Nejprve jsem je vložil do roztoku s hledaným iontem. Takový postup byl příliš zdlouhavý, proto jsem pokračoval s nanášením přes automatickou pipetu.



Obrázek 102 Schématické rozvržení reagentů na čipu



Obrázek 99 Papírový test

K detekci rtuťných iontů slouží komůrky 1. (tmavě modrá), 2. (tmavě modrá), 3. (tmavě modrá), 5. (světle modrá), 7. (žlutá), 10. (tmavě hnědá), 13. a 14. (oranžová) obrázek 36.

Pro detekci rtuťnatých iontů slouží komůrky 1. (tmavě modrá), 2. (tmavě modrá), 3. (tmavě modrá), 5. (světle modrá) a 7. (oranžová) obrázek 37.

K stanovení olovnatých iontů slouží komůrky 7. (zlatá) a 13. (žlutá) obrázek 38.

K stanovení nikelnatých iontů slouží komůrka 11. (růžová) obrázek 39.

Pro detekci stříbrných iontů slouží komůrky 1. (šedá), 2. (černá), 3. (grafitová), 9. (šedá), 13. a 14. (hnědočervená) obrázek 40.

K detekci dichromanových iontů slouží komůrka 8. (hnědočervená) obrázek 41.

K zjištění dusitých iontů slouží komůrka 9. (červená) obrázek 42.

K zjištění fosforečných iontů slouží komůrka 8. (tmavě žlutá) obrázek 43.

K stanovení mědnatých iontů slouží komůrky 2. (černá), 5. (červenohnědá) a 11. (světle zelená) obrázek 44.

K detekci kyanidových iontu slouží komůrky 3. (růžovočervená) a 16. (vybělí) obrázek 45.

Pro detekci chromanových iontů slouží komůrky 1. (žlutá) a 8. (hnědočervená) obrázek 46.

K zjištění barnatých iontů slouží komůrka 13. (zesvětlí) obrázek 47.

K stanovení amonných iontů slouží komůrky 1. (vybělí), 2. (světle růžová), 4. (světle hnědá) a 12. (modrá) obrázek 48.

Pro detekci kademnatých iontů slouží komůrky 1. (vybělí), 2. (vínová) a 6. (světle oranžová) obrázek 49.

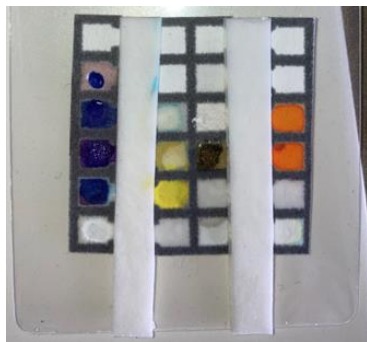
K stanovení zinečnatých iontů slouží komůrky 1. (vybělí), 2. (vínová) a 6. (světle

oranžová) obrázek 50.

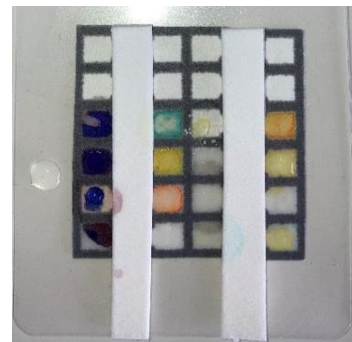
Pro detekci bismutitých iontů slouží komůrky 3. (hnědá), 7. (černá), 10. (hnědá), 13. a 14. (modrobílá) obrázek 51.

Pro detekci dusičnatých, síranových a fosforečnanových iontů slouží komůrka 4. (vybělí) obrázek 36-40, 43, 44, 47, 50, 51.

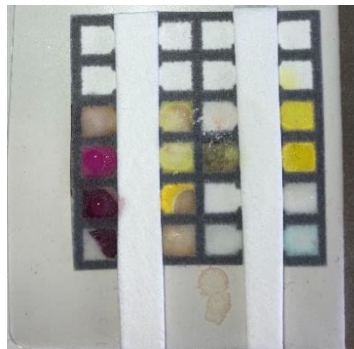
Teoreticky se dá využít papírový test k detekci arsenitých iontů, kde by se měl detekovat v komůrce 12. (zelený). Rovněž by měl detekovat arseničné ionty v komůrce 8. (čokoládově hnědá). Reakce jsem nemohl nijak ověřit praktickou zkouškou.



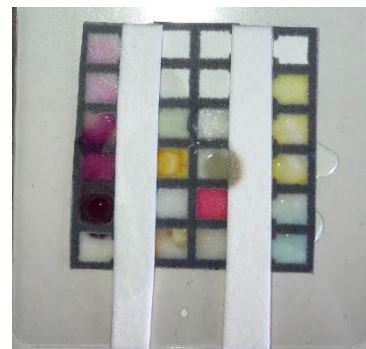
Obrázek 108 Papírový test s dusičnanem rtuťným



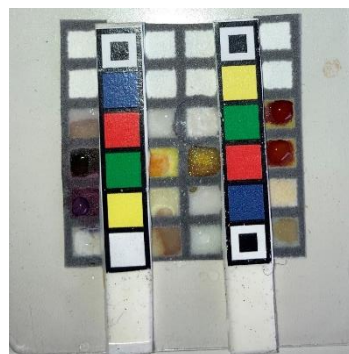
Obrázek 105 Papírový test s dusičnanem rtuťnatým



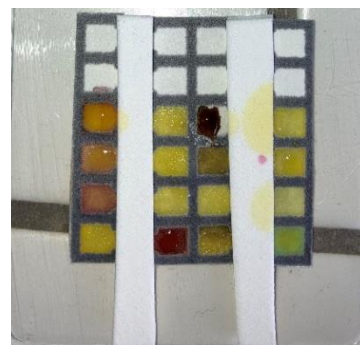
Obrázek 114 papírový test s dusičnanem olovnatým



Obrázek 111 Papírový test se síranem nikelnatým



Obrázek 120 Papírový test s dusičnanem stříbrným



Obrázek 117 Papírový test s dichromanem draselným



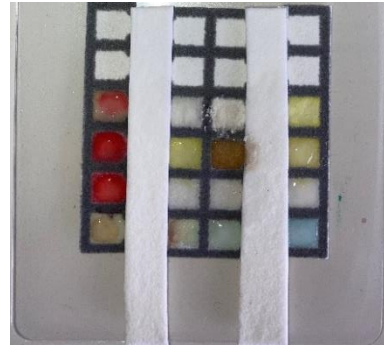
Obrázek 126 Papírový test s dusitanem sodným



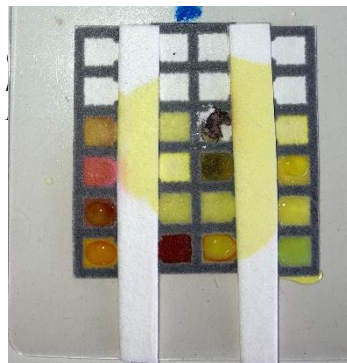
Obrázek 123 Papírový test s hydrogenfosforečnanem sodným



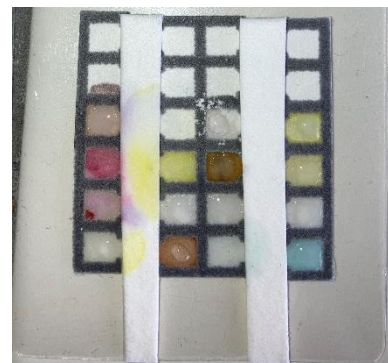
Obrázek 132 Papírový test se síranem měďnatým



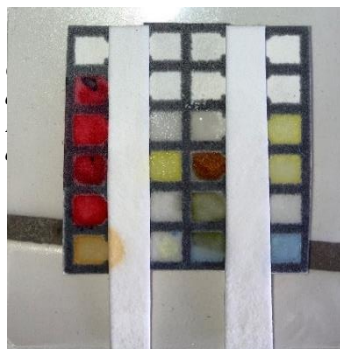
Obrázek 129 Papírový test s kyanidem draselným



Obrázek 138 Papírový test s chromanem draselným



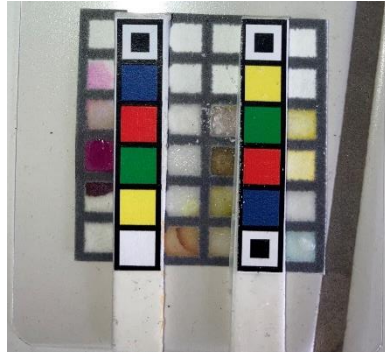
Obrázek 135 Papírový test s dusičnanem barnatým



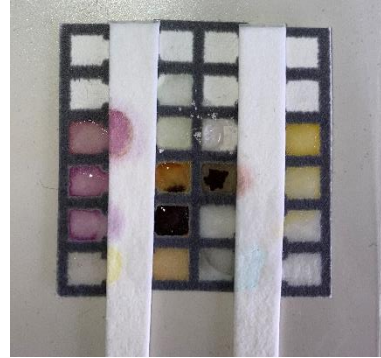
Obrázek 144 Papírový test s hydroxidem amonným



Obrázek 141 Papírový test s chloridem kadmenným



Obrázek 147 Papírový test se síranem zinečnatým



Obrázek 150 Papírový test s dusičnanem bismutitým

Detekce rtuťných, rtuťnatých, nikelnatých, stříbrných, dusitých, mědnatých, amonných a bismutitých iontu je jednoduchá, k vyhodnocení stačí zrak.

Olovnaté, fosforečné, dichromanové, chromanové, kyanidové a barnaté jsou složitější k rozeznání. Vhodným by mohl být program, který je schopen rozpoznat široké spektrum barevných odstínů a který by se dal nainstalovat do mobilního telefonu s fotoaparátem.

Kadmium a zinek mají stejné způsoby indikace. Není žádná metoda, jak na papírovém testu rozhodnout, zdali se jedná o jeden, o druhý nebo o oba zároveň. To nevadí, protože mají podobné vlastnosti a výskyt jednoho je doprovázen výskytem druhého (Pitter 2009).

Jedno pole jsem nechal úmyslně volné, kdyby došlo k rozšíření sady reagensů nebo zmenšení testu. Slouží k vizuálnímu porovnání, zdali voda neobsahuje pigment, který by mohl chybně indikovat přítomnost toxického iontu.

6 Závěr

V této bakalářské práci jsem hledal důkazové reakce na vybrané toxické ionty, kterých by se dalo využít při detekcích na filtračním papíře. Použité důkazové reakce vedly k pozitivním výsledkům. Pro většinu iontů jsem našel odpovídající reagenti nebo skupinu reagentů, které svými barevnými přechody indikovaly přítomnost.

Sestrojil jsem papírový test na laminovací fólii, který dokáže detekovat ve vodě přítomnost vybraných toxických iontů. Přechod vody ze sacího kanálku do detekčních komůrek je značně pomalý, konce sacích kanálků se musí ponechat několik minut ve vodě.

7 Literatura

- Bartoš M, Šrámková J, Staněk V. 2011. Analytická chemie. Pardubice: Univerzita Pardubice. 203 s. ISBN 978-80-7395-408-6.
- Bencko V, Lener J, Cikrt M. 1995. Toxické kovy v životním a pracovním prostředí člověka. 2. přepracované a doplněné vyd., v Grada Publishing 1. vyd. Praha: Grada. 282 s. ISBN 80-716-9150-X.
- Čermáková M, Štěpánková I. 2003. Klinická biochemie. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví. 120 s. ISBN 80-701-3372-4.
- Eddleston, M, Buckley NA, Eyer P, Dawson AH. 2008. Management of acute organophosphorus pesticide poisoning. *The Lancet*. 371(9612), 597-607.
- Folch A. 2013. Introduction to BioMEMS. New York: CRC Press. 528 s. ISBN 978-1-4665-0938-2.
- Herchel R. 2011. Laboratorní technika. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci. 100 s. ISBN 978-80-244-2857-4.
- Housecroft CE, Sharpe AG. 2014. Anorganická chemie. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. 1152 s. ISBN 978-80-7080-872-6.
- Kerdraon M, McGraw J, Dollet B, Jullien MC. 2019. Self-similar relaxation of confined microfluidic droplets. *Phys Rev Lett*. 123(5), 024501.
- Ke K, Hasselbrink EF, Hunt AJ. 2005. Rapidly Prototyped Three-Dimensional Nanofluidic Channel Networks in Glass Substrates. *Anal Chem*. 77(16), 5083-5088.
- Kellner R, Mermet JM, Otto M, Varcácel M, Widmer HM. 2004. Analytical Chemistry: A Modern Approach to Analytical Science. 2ed ed. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. 1209 s. ISBN 3527305904.
- Kříženecká S, Synek V. 2014. Základy analytické chemie. Ústí nad Labem: Univerzita Jana Evangelisty Purkyně. 143 s. ISBN 978-80-7414-804-0.
- Křížková S, Adam V, Kizek R. 2009. Fytotoxicita stříbrných iontů. *Chem Listy*. 103(7), 559-568.
- Kučková Š. 2006. Laboratoře z analytické chemie: Důkazové reakce kationtů a aniontů. Praha: Pedagogická fakulta Univerzita Karlova. 29 s.
- Li X, Zhou Y. 2013. Microfluidic devices for biomedical applications. Cambridge: Woodhead Publishing Limited. 676 s. ISBN 978-0-85709-697-5.

- Lim H, Jafry AT, Lee J. 2019. Fabrication, flow control, and applications of microfluidic paper-based analytical devices. *Molecules*. 24(16), 2869.
- Linhart I, Lener J, Cikrt M. 2012. Toxikologie: interakce škodlivých látek s živými organismy, jejich mechanismy, projevy a důsledky. 2. přepracované a doplněné vyd., v Grada Publishing 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. 376 s. ISBN 978-80-7080-806-1.
- Martinez AW, Phillips ST, Whitesides GM. 2007. Patterned paper as a platform for inexpensive, low-volume, portable bioassays. *Anal Chem*. 46(8), 1318-1320.
- Müller RH, Clegg DL. 1949. Automatic paper chromatography. *Anal Chem*. 24(16), 1123-1125.
- Nies DH. 2003. Article navigation efflux-mediated heavy metal resistance in prokaryotes. *FEMS Micro Revi*. 27(2-3), 313-339.
- Ogończyk D, Węgrzyn J, Jankowski P, Dabrowski B. 2010. Bonding of microfluidic devices fabricated in polycarbonate. *Lab on a chip*. 10(10), 1324-1327.
- Okáč A. 1946. Analytické reakce. 2. vyd. Praha: Jednota československých matematiků a fyziků. 146 s.
- Okáč A. 1956. Analytická chemie kvalitativní. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd. 509 s.
- Opekar F, Šrámková J, Staněk V. 2010. Základní analytická chemie pro studenty, pro něž analytická chemie není hlavním studijním oborem. 2. vyd. Praha: Karolinum. 203 s. ISBN 978-80-246-1775-6.
- Pitter P. 2009. Hydrochemie. 4., aktualiz. vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT Praha. 568 s. ISBN 978-80-7080-701-9.
- Ronggui S, Righini G. 1991. Characterization of reactive ion etching of glass and its applications in integrated optics. *J Vac Sci Technol*. 9(5), 2709.
- Schlautmann S, Wensink H, Schasfoort R, van den Berk A. 2001. Powder-blasting technology as an alternative tool for microfabrication of capillary electrophoresis chips with integrated conductivity sensors. *J Micromech Microeng*. 11(4), 386-389.
- Skoog DA, West DM, Holler FM, Crouch SR. 2019. Analytická chemie. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. 984 s. ISBN 978-80-7592-043-0.
- Štulík K. 2004. Analytické separační metody. Praha: Karolinum. 264 s. ISBN 80-246-0852-9.

Vlček V, Pohanka M. 2011. Environmental aspects of organophosphorus and carbamate pesticides approved for use in the czech republic. Chem listy. 105(12), 908-912.

Tesař V. 2008. Mikrofluidika. Automa. 14(10), 6-9.

Univerzita Palackého v Olomouci. Přenosné nízkonákladové zařízení pro multiparametrovou chemickou analýzu. Původci: Petr J, Meier V, Švidrnoch M, Hárendarčíková L. Česká republika. Patentový spis CZ 307248 B6. 3.2.2017.

Waddell EA, Kramer GW. 2002. UV laser micromachining of polymers for microfluidic applications. JALA. 7(1), 78-82.

White F. 2011. Fluid mechanics. 7th ed. New York: McGraw-Hill. 864 s. ISBN 978-0-07-352934-9.

Xia Y, Whitesides GM. 1998. SOFT LITHOGRAPHY. Annu Rev Mater Res. 28(1), 153-184.

Zachář P, Sýkora D. 2019. Plynová chromatografie. Praha: VŠCHT. 11 s.

Zhang J, Tan KL, Hong GD, Yang LJ, Gong HQ. 2001. Polymerization optimization of su-8 photoresist and its applications in microfluidic systems and mems. J Micromech Microeng. 11(1), 20.

Online zdroje

Batha E. Death of a river. [online]. 15. 3. 2000. [cit. 2022-05-04]. Dostupné z:

<http://news.bbc.co.uk/2/hi/europe/642880.stm>

Nářízení č. 401/2015 Sb., o ukazatelích a hodnotách přípustného zněčištění povrchových vod a odpadních vod, náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod povrchových a do kanalizací a o citlivých oblastech. In [Systém ASPI]. Wolters Kluwer [cit. 2022-4-26].

Dostupné z: www.aspi.cz ISSN 2336-517X.

Noakes C, Sleight A. "Real fluids" An Introduction To Fluid Mechanics. [online]. Leeds: University of Leeds. Januar 2009. [cit. 2022-03-28]. Dostupné z:

https://web.archive.org/web/20101021003853/http://www.efm.leeds.ac.uk/CIVE/CIVE1400/Section4/laminar_turbulent.htm

Petrlík J, Havel M, Petrlíková Mašková P. Toxické látky: Databáze látek. [online]. [2010] [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://arnika.org/toxicke-latky/databaze-latek>

[PVK] Pražské vodovody a kanalizace. Spotřeba vody. [online]. [2022] [cit. 2022-05-04].

Dostupné z: <https://www.pvk.cz/vse-o-vode/pitna-voda/spotreba-vody/>

Vyhláška č. 252/2004 Sb., kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a tepelnou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody. In [Systém ASPI]. Wolters Kluwer [cit. 2022-4-26].

Dostupné z: www.aspi.cz. ISSN 2336-517X.