

Senzor pro měření vlhkosti a organických par na bázi polyanilinu (PANI)

Klára Bartošová

Bakalářská práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav inženýrství polymerů
akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Klára Bartošová**
Osobní číslo: **T11665**
Studijní program: **B2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Polymerní materiály a technologie**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Senzor pro měření vlhkosti a organických par na bázi polyanilinu (PANI)**

Zásady pro vypracování:

**Vypracujte literární studii na dané téma.
Provedte syntézu a potřebné analýzy sensorického členu.
Vyhodnoťte odezvy pro vlhkost a organické páry.**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Richard Blair, Construction of a Polyaniline Nanofiber Gas Sensor, J. Chem. Educ., 2008, 85 (8), p 1102, doi: 10.1021/ed085p1102

Jaroslav Stejskal and Irina Sapurina, Polyaniline: Thin films and colloidal dispersions, Pure Appl. Chem., Vol. 77, No. 5, pp. 815–826, 2005. doi: 10.1351/pac200577050815, 2005 IUPAC

Karl Crowley, Malcolm R. Smyth, Anthony J. Killard, Aoife Morrin, Printing polyaniline for sensor applications, Chemical Papers, August 2013, Volume 67, Issue 8, pp 771–780

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Robert Olejník**
Centrum polymerních materiálů

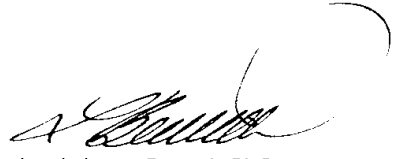
Datum zadání bakalářské práce: **10. ledna 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **28. května 2014**

Ve Zlíně dne 7. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

L.S.


Ing. Lubomír Beníček, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: BARTOŠOVÁ KLÁRA

Obor: CHTM - IP

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 21.5.2014

Bartošová

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlíží k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na senzory pro měření vlhkosti a organických par na bázi polyanilinu. Teoretická část je věnována základní charakterizaci polyanilinu, konkrétně jeho historii, přípravě a struktuře. Poté jsou přiblíženy analytické metody, uhlíkové nanotrubičky a zejména je vysvětlen základní princip senzorů. V praktické části je popsána syntéza sensorického členu na bázi polyanilinu. Vzniklý polymer je poté použitý pro měření relativní vlhkosti. Pro odezvy organických par je taktéž využito tohoto vodivého polymeru a sítí uhlíkových nanotrubic. Za účelem zjištění selektivity jsou tyto dva vzorky současně vystavovány parám pěti různých rozpouštědel.

Klíčová slova: Polyanilin, senzor, vlhkost, organické páry

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the polyaniline based sensors for humidity and organic vapors detection. The theoretical part is devoted to the basic characteristic of polyaniline, namely its history, preparation and structure. Subsequently the analytical methods, carbon nanotubes and especially the basic principle of sensors are described. The practical part describes the synthesis of a polyaniline based sensory element. Formed polymer is then used to measure the relative humidity. This conductive polymer as well as carbon nanotube network is also used to measure the response for organic vapors. These two samples are simultaneously exposed to vapors of five different solvents in order to detect selectivity.

Keywords: Polyaniline, Sensor, Humidity, Organic Vapors

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Robertovi Olejníkovvi, Ph.D., za cenné rady, odborné vedení a vynaložený čas při vzniku této práce. Poděkování patří také všem, kteří mi vytvářeli potřebné podmínky pro vypracování této práce, především rodině.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 POLYMERY	12
1.1 VODIVÉ POLYMERY	12
1.2 DOPOVÁNÍ VODIVÝCH POLYMERŮ	13
1.3 CHARAKTERISTIKA ELEKTRICKÉ VODIVOSTI	14
2 POLYANILIN	15
2.1 HISTORIE POLYANILINU.....	15
2.2 STRUKTURA A FORMY POLYANILINU	15
2.3 VLASTNOSTI POLYANILINU.....	16
2.4 PŘÍPRAVA POLYANILINU.....	17
3 ANALYTICKÉ A CHARAKTERISTICKÉ METODY	18
3.1 ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE	18
3.1.1 Skenovací elektronový mikroskop – SEM.....	18
3.1.2 Transmisní elektronový mikroskop – TEM	19
3.2 INFRAČERVENÁ SPEKTROSKOPIE – IR.....	20
3.3 ELEKTRICKÝ ODPOR	21
3.3.1 Ohmův zákon	21
3.3.2 Měření elektrického odporu	21
3.3.3 Dvoubodová metoda	22
3.3.4 Čtyřbodová metoda	22
4 UHLÍKOVÉ NANOTRUBICE (CNT)	23
4.1 ROZDĚLENÍ UHLÍKOVÝCH NANOTRUBIC	23
4.2 STRUKTURA A VLASTNOSTI UHLÍKOVÝCH NANOTRUBIC.....	24
4.3 VÝROBA UHLÍKOVÝCH NANOTRUBIC	24
5 SENZORY	27
5.1 HISTORICKÝ VÝVOJ A MOŽNOSTI VYUŽITÍ	27
5.2 PODSTATA FUNGOVÁNÍ SENZORŮ	27
5.3 DRUHY SENZORŮ.....	28
5.4 SENZORY PRO MĚŘENÍ VLHKOSTI	29
5.4.1 Možnosti uplatnění.....	29
5.4.2 Charakteristika vlhkosti	30
5.4.3 Senzory pro měření relativní vlhkosti	31
5.4.4 Využití vodivých polymerů v rámci senzorů pro měření vlhkosti.....	32
5.5 SENZORY PRO MĚŘENÍ PLYNŮ A PAR.....	33
5.5.1 Organická rozpouštědla.....	34
5.5.2 Senzory pro měření organický par	35
5.5.3 Využití vodivých polymerů v rámci senzorů pro měření organických par.....	35
II PRAKTICKÁ ČÁST	37
6 CÍL PRÁCE	38

7	SYNTÉZA VZORKŮ	39
7.1	PŘÍPRAVA PANI.....	39
7.1.1	PANI ve formě granulí.....	39
7.1.2	PANI ve formě nanovláken.....	39
7.2	PŘÍPRAVA SÍTĚ CNT	40
7.3	ŘÍZENÁ RELATIVNÍ VLHKOST (RH) ZA POUŽITÍ ROZTOKU GLYCEROL-VODA	41
7.4	TLAKY NASYCENÝCH PAR A OBJEMOVÉ PODÍLY	42
	VÝSLEDKY A DISKUZE	43
7.5	ODEZVY NA VLHKOST	43
7.5.1	Měření relativní vlhkosti	43
7.6	ODEZVY NA ORGANICKÉ PÁRY	47
7.6.1	Měření organických par	47
7.7	SEM MIKROSKOPIE	52
7.8	INFRAČERVENÁ SPEKTROSKOPIE	53
8	POUŽITÉ PŘÍSTROJE A CHEMIKÁLIE	55
8.1	PŘÍSTROJE	55
8.2	CHEMIKÁLIE.....	56
	ZÁVĚR	59
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	60
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	65
	SEZNAM OBRÁZKŮ	66
	SEZNAM TABULEK	68

ÚVOD

Ve dvacátém století se lidstvo začalo setkávat s novým druhem materiálů, které se v přírodě nenacházely. Jednalo se o syntetické materiály, nazývané polymery. Ačkoli je jednou ze základních vlastností těchto materiálů schopnost izolovat elektrický proud, existují rovněž polymery, jež vykazují elektrickou vodivost srovnatelnou s některými polovodiči.

Vodivé polymery, často označované jako „inteligentní“ materiály, se dostaly do širšího povědomí na konci sedmdesátých let dvacátého století. Tento zvýšený zájem byl zapříčiněn publikací vědeckých prací budoucích laureátů Nobelovy ceny za chemii, mezi něž se řadí Alan J. Heeger, Alan G. MacDiarmide a Hideki Širakawa. Vodivé polymery jsou tvořeny systémem střídání jednoduchých a dvojných vazeb (konjugací) ve struktuře molekul. Kromě systému těchto vazeb je nepostradatelným předpokladem vodivosti přítomnost nosičů náboje, které zprostředkovávají transport tohoto náboje po řetězci. Aplikace vodivých polymerů je možná v široké škále odvětví a činností, přičemž příkladem může být mikroelektronika nebo zobrazovací technika.

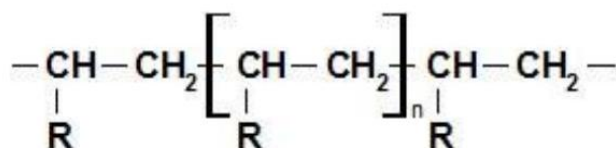
Polyanilin se řadí do skupiny nejčastěji studovaných vodivých polymerů. Jeho příprava je založena na oxidaci anilinu a nachází se v řadě forem s různými fyzikálními i chemickými vlastnostmi. Z těchto forem je patrně nejzajímavější zelená vodivá proponovaná forma, tzv. emeraldinová sůl, která může přejít deprotonací na modrou nevodivou bázi. Vodivost polyanilinu se pohybuje okolo 10^{-9} až $1 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ a je ovlivněna dopováním, kdy dochází ke změně rozložení elektronů v polymerním řetězci. Polyanilin se často uplatňuje při výrobě senzorů.

Tématem této bakalářské práce je senzor na bázi polyanilinu pro měření vlhkosti a organických par. Úvodní teoretická část je věnována obecné problematice vodivých polymerů a polyanilinu. Dále je zvýšená pozornost věnována zejména analytickým metodám, uhlíkovým nanotubicím a teoretickým základům pro pochopení fungování senzorů. Experimentální část se zabývá přípravou senzorického členu a následně vyhodnocením získaných výsledků.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERY

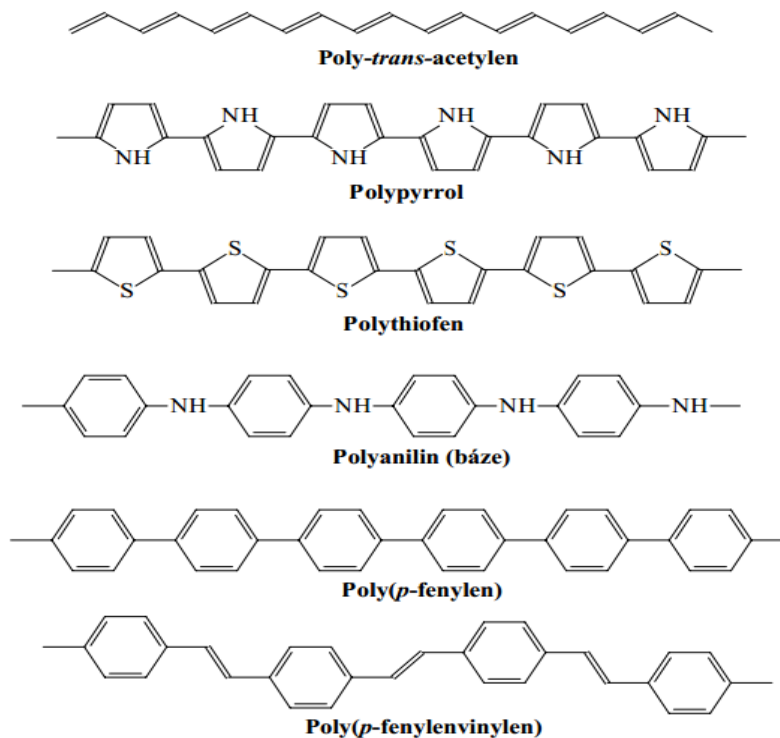
Polymery jsou organické látky, tvořené molekulami (makromolekulami), u kterých se mnohonásobně opakuje jeden či více druhů atomů nebo skupin atomů (konstitučních jednotek) navzájem spojených do velkého počtu. Mezi běžné polymery patří např. polypropylen nebo polyvinylchlorid a jsou význačné tím, že jsou nevodivé a často se uplatňují jako materiály izolující vodiče elektrického proudu, tepelné izolanty či vrstvy tlumící zvuk [1].



Obrázek 1. Obecný vzorec polymeru [1].

1.1 Vodivé polymery

Většina běžných polymerů je tvořena převážně z uhlíkových atomů a jejich důležitou funkcí je izolace materiálů. Výjimkou je skupina polymerů vykazující vlastní elektrickou vodivost.



Obrázek 2. Nejdůležitější vodivé polymery [2].

Mezi nejvýznamnější zástupce vodivých polymerů patří polyacetylen, polypyrrol, polythiofen, polyanilin, poly(p-fenylen) či poly(p-fenylenvinylen), viz Obrázek 2. Jejich vodivost je založena na systému konjugovaných dvojných vazeb, tj. pravidelné střídání jednoduchých a dvojných vazeb ve struktuře. Kromě systému těchto vazeb je nezbytným předpokladem elektrické vodivosti přítomnost pohyblivých nosičů náboje, které umožňují transport po konjugovaném řetězci. Elektrická vodivost této skupiny konjugovaných polymerů je srovnatelná s vodivostí anorganických polovodivých materiálů a pohybuje se v rozmezí $0,01 - 30 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ [2].

1.2 Dopování vodivých polymerů

Dopování vodivých polymerů ovlivňuje jejich elektrickou vodivost a provádí se více možnými způsoby. Prvním způsobem dopování může být chemická cesta. Základem je oxidace řetězce polymeru, což je označováno jako p-dopování. U tohoto způsobu je polymer vystaven oxidačním činidlům, jako je například I_2 . Při oxidaci se odeberou elektrony působením akceptorů elektronů a tím vznikne pozitivně nabitý polymer. Další variantou chemického dopování je redukce řetězce polymeru, tzv. n-dopování. Při tomto způsobu jde o reakci polymeru s redukčním činidlem, např. Li . Redukce produkuje působením donorů elektronů záporně nabitý řetězec polymeru. U anorganických polovodičů zřetelně ovlivňují elektrické vlastnosti stopové koncentrace dopující látky, zatímco u polymerů je třeba vyšších koncentrací dopujících látek. Další metodou dopování konjugovaných polymerů je elektrochemické dopování, kde se využívá principu elektrolýzy. Do elektrolytu, ve kterém není daný dopovaný polymer rozpustný, je zavedena pracovní elektroda. Rozdíl elektrického potenciálu mezi pracovní a referenční elektrodou vyvolává vstup náboje a příslušného iontu do molekuly polymeru ve formě příspěvku (n-dopování) nebo úbytku elektronu (p-dopování). Rozdíl je také v tom, na kterou elektrodu se polymer umístí. Je-li umístěn na katodu, bude probíhat redukční reakce, a jedná se tedy o n-dopování. Naopak, jestliže je polymer situován na anodě, jde o oxidační reakci, tedy o p-dopování. U obou způsobů dopování, jak chemickém, tak i elektrochemickém, dochází ke změně charakteru vazeb u polymerního řetězce. Atomy dopující látky přemísťují nositelé náboje v oblasti svého působení, aniž by vstupovaly do chemické vazby s polymerem [3, 4, 5].

1.3 Charakteristika elektrické vodivosti

Konduktivita neboli elektrická vodivost, je fyzikální veličina, která popisuje schopnost látky vést elektrický proud. Obecně platí, že látky vyznačující se dobrou elektrickou vodivostí mají vysokou hodnotu konduktivity, zatímco pro látky se špatnou elektrickou vodivostí je charakteristická nízká hodnota konduktivity [6].

Tabulka 1. Srovnání konduktivity vodičů, polovodičů a izolantů [6].

Druh materiálu	Měrná el. Vodivost [S.cm ⁻¹]
vodiče	10 ³ až 10 ⁶
polovodiče	10 ⁻⁸ až 10 ³
izolanty	10 ⁻²⁰ až 10 ⁻⁸

2 POLYANILIN

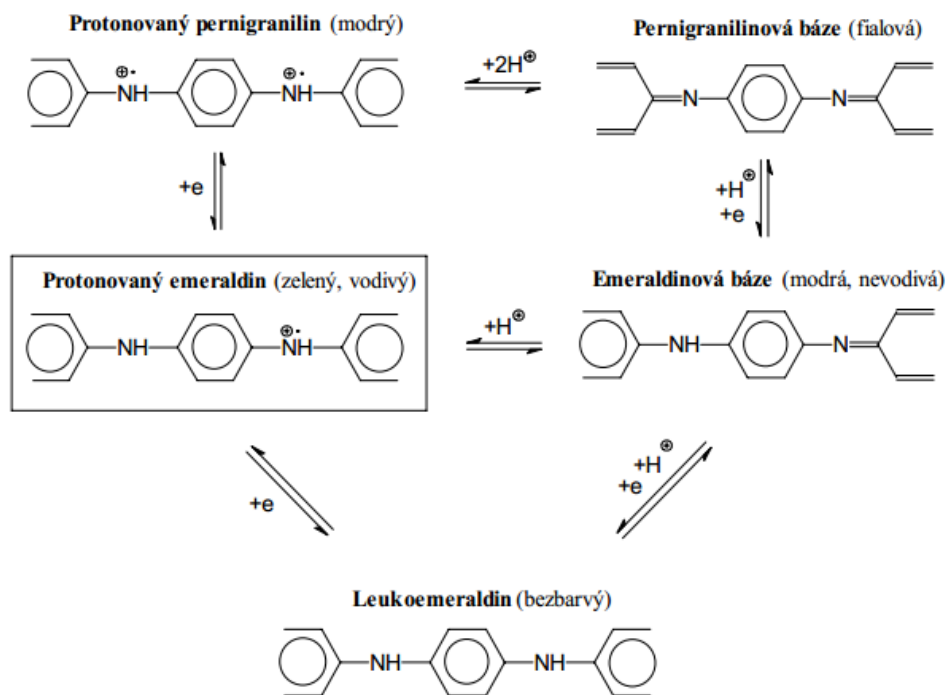
Polyanilin (PANI) je jeden z nejčastěji studovaných vodivých polymerů, jelikož vyniká svou vysokou elektrickou vodivostí. Další výhodou tohoto vodivého polymeru je ekonomicky nenáročná příprava a také tepelná stabilita. Všechny tyto vlastnosti a mnoho dalších se využívají k různým aplikacím, jako jsou například organické elektrody, senzory a plniva v polymerních kompozitech [7, 8].

2.1 Historie polyanilinu

PANI je patrně nejstarším syntetickým polymerem, který člověk vytvořil. Anilin byl získán jako produkt pyrolytické destilace indiga německým chemikem Unverdorbenem v roce 1826. Při studiu jeho chemických vlastností byly popsány roku 1840 zelené oxidační produkty, které bychom dnes nazvali PANI. V roce 1862 udělal britský profesor chemie Letheby elektrochemickou oxidací při toxikologické identifikaci anilinu, která po alkalizaci vedla k modrému zbarvení typickému pro PANI bázi. Britští chemici Green a Woodhead v roce 1910 navrhli pro oxidační produkty anilinu strukturu oktameru. Polymerní povaha oxidačních produktů anilinu byla dokázána o mnoho desítek let později. V Československu, roku 1968 Honzlem a spol., byly popsány syntetické postupy vedoucí k PANI. Zvětšující se zájem o vodivé polymery se projevil až na konci sedmdesátých let dvacátého století [9].

2.2 Struktura a formy polyanilinu

PANI řetězce se skládají ze stovky až tisíců anilinových konstitučních jednotek, jedná se tedy o plnohodnotný polymer. PANI existuje v mnoha formách, které se liší svým stupněm oxidace či protonace, což znázorňuje Obrázek 3. Chemickou nebo elektrochemickou oxidací a redukcí lze získat formy s různou chemickou strukturou, zbarvením, stabilitou a elektrickými vlastnostmi. Nejznámější formou PANI je emeraldinová sůl, která je vodivá a zeleně zbarvená. Přechod mezi zelenou vodivou formou a nevodivou modrou formou nastává při pH 5 – 6, pokud PANI po přípravě vystavíme působení alkálií. Tímto přechodem se vodivost mění o devět řádů, z jednotek $\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ na $10^{-9} \text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ a proces je vratný. Vodivost PANI je ovlivněna dopováním, při tomto ději dochází ke změně rozložení elektronů v polymerním řetězci nikoliv však ke změně počtu elektronů v polymerním řetězci [2, 9].



Obrázek 3. Formy polyanilinu [2].

2.3 Vlastnosti polyanilinu

PANI, jak už bylo uvedeno, je jedním z nejkoumanějších vodivých polymerů, a ve srovnání s ostatními vodivými polymery je velmi nadřazený, viz Tabulka 2.

Tabulka 2. Porovnání elektrické vodivosti, teplotní stability a zpracovatelnosti u vybraných vodivých polymerů [10].

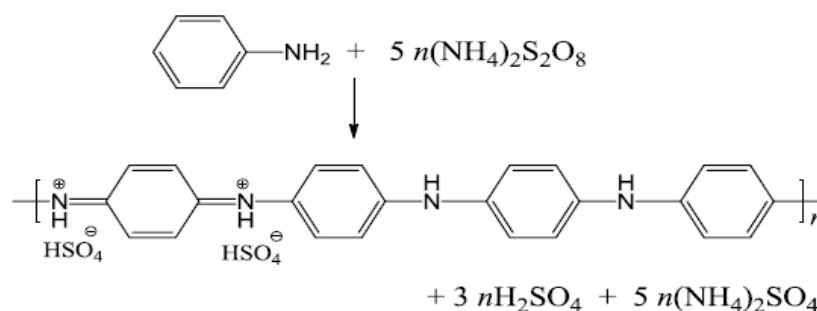
Polymer	Elektrická vodivost ($S \cdot cm^{-1}$)	Teplotní stabilita	Zpracovatelnost
Polyacetyl	$10^{-3} - 10^{-5}$	špatná	omezená
Polyfenyl	1000	špatná	omezená
Poly-(p-fenylenvinylen)	1000	špatná	omezená
Polypyrrol	100	dobrá	dobrá
Polythiofen	100	dobrá	výborná
Polyanilin	10	dobrá	dobrá

Zmíněná nadřazenost je dána jeho výbornými vlastnostmi. Příkladem je jeho tepelná kapacita, která je mnohem vyšší oproti ostatním vodivým polymerům. Další důležitou vlastností PANI je jeho elektrická vodivost a zpracovatelnost. Náklady na výrobu anilinu (monomeru) jsou mnohem nižší než náklady na výrobu ostatních vodivých polymerů,

taktéž syntéza PANI je finančně a časově nenáročná a jeho vlastnosti jdou jednoduše ladit. Z těchto hledisek je tudíž PANI ekonomicky velmi výhodný [10].

2.4 Příprava polyanilinu

PANI se připravuje oxidací anilinu, obvykle peroxydisíranem amonným v kyselém vodném prostředí. Zmíněnou reakci popisuje Obrázek. 4. Exotermní reakce probíhá na vzduchu, při laboratorní teplotě, s téměř stoprocentním výtěžkem.



Obrázek 4. Oxidace anilinu peroxydisíranem amonným poskytuje PANI [2].

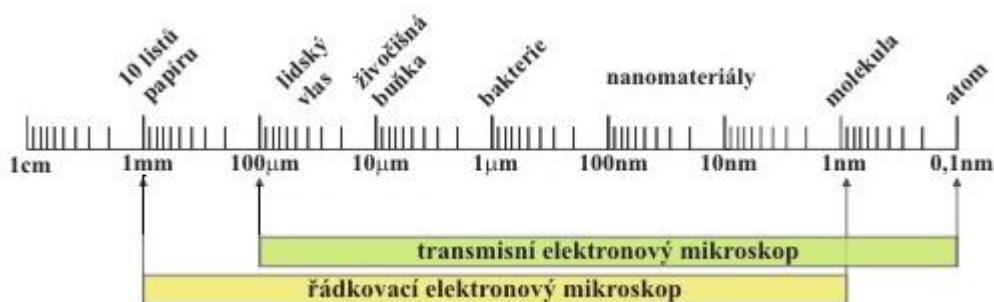
Při praktickém provedení odděleně rozpustíme 2,59 g (20 mmol) anilinu v 50 ml vody a 5,71 g (25 mmol) peroxydiráranu amonného opět v 50 ml vody, poté oba roztoky smísíme a reakce musí probíhat v kyselém prostředí. Reakční směs po chvíli zmodrá, začne se tvořit pernigranilinová forma PANI, která po ukončení polymerace přechází na tmavozelený emeraldin. Polymerace není časově náročná, proběhne přibližně za 10 minut při laboratorní teplotě, přičemž teplota reakční směsi vzroste z 20 °C na 38 °C. PANI sraženinu odfiltrujeme, promyjeme zředěnou 0,2 M kyselinou chlorovodíkovou a poté acetonem nebo etanolem. Produkt se suší na vzduchu, pro dokonalejší dosušení se použije vakuum při 60 °C. Takto připravený PANI (emeraldin) má elektrickou vodivost okolo 4 S.cm⁻¹.

Jestliže ponoříme libovolný předmět (sklo, textilní tkaninu, polymer), stálý v kyselém prostředí, do reakční směsi při oxidaci anilinu, dojde na jeho povrchu k pokrytí vodivým PANI filmem [2].

3 ANALYTICKÉ A CHARAKTERISTICKÉ METODY

3.1 Elektronová mikroskopie

Elektronová mikroskopie je jednou z nejčastěji používaných technik pro zkoumání mikrostruktury. Elektronové mikroskopy jsou také optické přístroje, avšak místo světelného svazku používají elektrickým polem urychlené elektrony a místo čoček skleněných jsou použity elektromagnetické čočky. Zkoumaný vzorek musí být ve vakuu, aby nedocházelo k interakcím elektronů s atmosférou. Důležitým faktorem mikroskopů je mezní rozlišovací schopnost, která je úměrná vlnové délce použitého záření. Elektronové záření umožňuje dosáhnout mnohem vyššího rozlišení než elektromagnetické záření.



Obrázek 5. Ukázka velikosti objektů pozorovatelných elektronovým mikroskopem [11].

Elektronovou mikroskopii dělíme podle fyzikální tvorby obrazu na skenovací elektronovou mikroskopii neboli SEM (Scanning Electron Microscopy) a na transmisní elektronovou mikroskopii označovanou zkratkou TEM (Transmission Electron Microscopy) [11].

3.1.1 Skenovací elektronový mikroskop – SEM

Skenovací elektronový mikroskop, často také označovaný jako rastrovací nebo řádkový mikroskop, umožňuje pozorování povrchů zkoumaných objektů při velkém zvětšení, a to díky výrazně kratší vlnové délce elektronů, než jakou mají fotony.

Dopadající elektrony na pozorovaný vzorek a vzájemné působení s hmotou vyvráží elektrony ze vzorku. Takto vyražené elektrony jsou přitahovány pomocí vhodného potenciálu na detektory. Důsledkem je vznik signálu upraveného pro zpracování v zobrazovacím systému. Zobrazovacím systémem většinou bývá televizní obrazovka, na které se vytvoří obraz, který vznikl řádkováním (rastrováním) elektronového paprsku na pozorované ploše. Výsledkem je snímek, zachycující povrchovou strukturu vzorku.

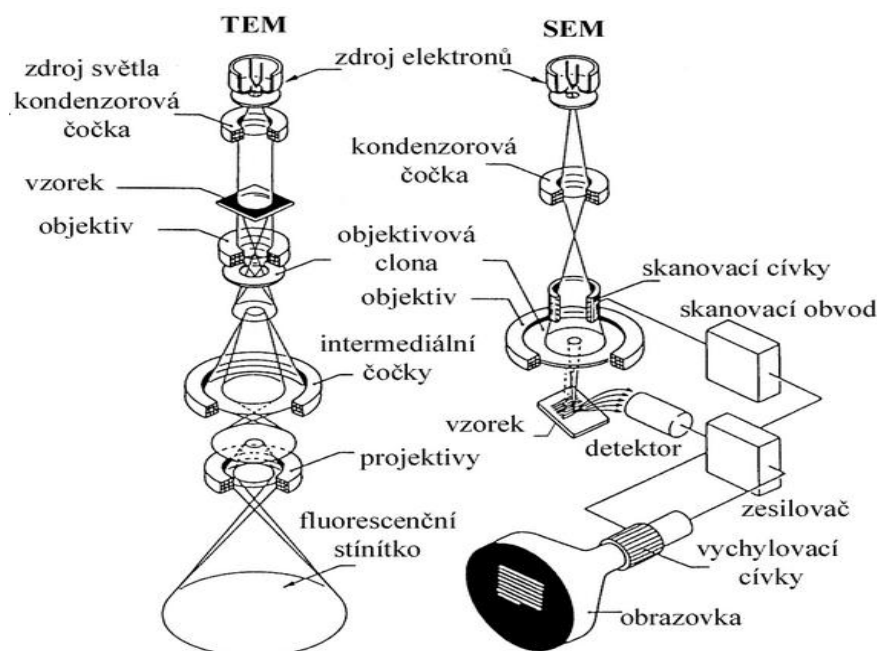
Vzorek nesmí být znečištěn a nesmí obsahovat vodu, protože by v prostředí vakua docházelo k prudkému uvolňování molekul vody a uvnitř vzorku by došlo k degradačním reakcím. U vzorku se využívá širokého spektra zvětšení ($\sim 20\text{-}100\,000\times$), takže není třeba vzorek řezat na tenkou vrstvu [12, 13].

3.1.2 Transmisní elektronový mikroskop – TEM

Transmisní elektronová mikroskopie umožňuje zobrazit mikrostrukturu uvnitř materiálu. Pomocí elektronové difrakce dokáže určit symetrii krystalové mřížky, a pokud mikroskop obsahuje příslušné spektrometry, lze provést i lokální analýzu chemického složení [14].

Pozorovaným vzorkem pronikají elektrony a interakce s ním jsou odchýlené od původního směru, jímž se hlavní svazek pohyboval. Obraz je tvořen z velké části dopadem neodchýlených elektronů na zobrazovací systém, který je tvořen většinou stínítkem z luminiscenčního materiálu. Výsledným obrazem je průmět vnitřní struktury vzorku do plochy [12].

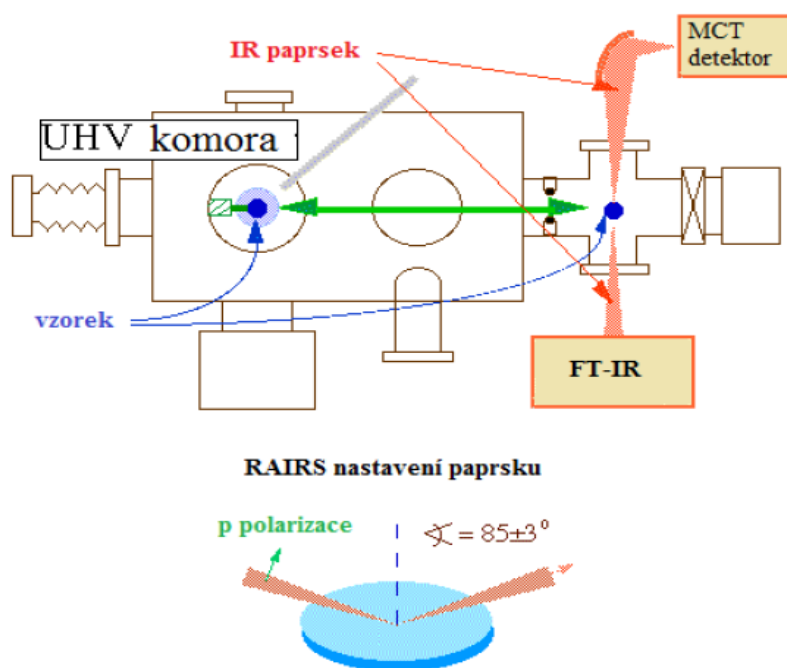
Podobně jak je to u SEM, tak i u TEM musí být vzorky zbavené vody, jelikož by docházelo k jejich degradaci. Aby bylo dále možné se vzorkem pracovat, jeho maximální tloušťka nesmí přesáhnout 100 nm, protože kdyby došlo k průchodu elektronů, obraz by byl zatížen chromatickou vadou a nešlo by jej zaostřit [14].



Obrázek 6. Popis a porovnání konstrukce transmisního elektronového mikroskopu a skenovacího elektronového mikroskopu [14].

3.2 Infračervená spektroskopie – IR

Infračervená spektroskopie je analytická metoda určená pro identifikaci a strukturní charakterizaci organických sloučenin a také pro stanovení organických látek, jelikož dává možnost určit přítomnost jednotlivých funkčních skupin v molekule organické látky. Výhodou této metody je, že vzorek není při analýze poškozen a přesto poskytuje informace o svém složení. Hodnoty získané z vibračních energií souvisí s pevností chemických vazeb a také s hmotnostmi jader a molekulovou geometrií, tedy s molekulovou strukturou. Přestože je tato metoda využívána při analýze makroskopických vzorků, její podstatou je interakce mikročástic zkoumaného vzorku s infračerveným zářením [16, 17].



Obrázek 7. Princip Infračervené spektroskopie [19].

Principem infračervené spektroskopie je absorpce elektromagnetického záření v infračervené oblasti, studuje se množství pohlceného záření v závislosti na jeho vlnové délce nebo vlnočtu. Infračervenými spektry se sledují rotační a vibrační přechody v molekulách. Pokud je změna těchto přechodů spojena se změnou dipólových momentů, pak dochází k absorpci záření, které je charakteristické pro danou vazbu v molekule. Oblast spektra v rozmezí vlnočtů $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ je nejvýznamnější při identifikaci organických sloučenin, které se v této oblasti projevují největším počtem absorpčních pásů. Navíc oblast od 650 cm^{-1} do 1500 cm^{-1} je typická pro každou organickou látku. Velkou výhodou infračervené spektroskopie je možnost měřit vzorky ve všech

skupenstvích. Příkladem měření v pevné fázi je obvykle využívaná technika KBr tablet, u nichž při průchodu infračerveného záření dochází jen k malým ztrátám intenzity záření způsobeným odrazem. Pokud je vzorek v kapalně fázi, je zapotřebí použít kyvety zhotovené z halogenidů alkalických kovů. Kyvety je třeba uchovávat v dokonale suchém prostředí, taktéž rozpouštědlo, které je používáno k měření, nesmí obsahovat vodu [18].

3.3 Elektrický odpor

Elektrický odpor je fyzikální veličina, která charakterizuje schopnost daného systému vést elektrický proud. Příčinou elektrického odporu jsou srážky vodivostních elektronů s ionty mřížky. Každý materiál, jako kov, elektrolyt, polovodič i případně reálné nevodiče, kladou procházejícímu elektrickému proudu elektrický odpor.

V praxi je princip elektrického odporu používán například u senzorů, u kterých dochází ke změně elektrického odporu na základě působení vnějších podnětů. Takovéto vnější podněty mohou být například změna průřezu při stlačování vodiče, změna délky při prodlužování vodiče či změna měrného odporu vodiče při jeho vystavení teplotě, světlu nebo vlhkosti [20].

3.3.1 Ohmův zákon

Ohmův zákon byl poprvé formulován v roce 1826 německým fyzikem G. S. Ohmem a popisuje vztah mezi elektrickým odporem, napětím a proudem. Elektrický proud I procházející elektrickým vodičem je přímo úměrný elektrickému napětí U mezi konci tohoto vodiče. Pro různé vodiče je konstanta úměrnosti mezi I a U odlišná. Proto se uvádí za stálé teploty a pro daný vodič charakteristická veličina zvaná elektrický odpor R (rezistence). Je definována vztahem:

$$R = \frac{U}{I} \quad (1)$$

Hlavní jednotka elektrického odporu je ohm (Ω). Převrácená hodnota R se nazývá elektrická vodivost G (konduktance) a její jednotkou je siemens (S) [20].

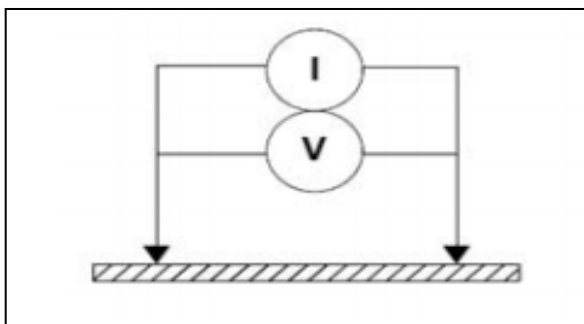
3.3.2 Měření elektrického odporu

Měření elektrického odporu se provádí dvěma metodami, přímou a nepřímou. Přímou metodou se rovnou získá hodnota měřeného elektrického odporu a to pomocí měřicího přístroje, např. multimetru. Naopak u nepřímé metody se nejdříve získají hodnoty veličin,

jejichž následným zpracováním se dostanou hodnoty měřeného elektrického odporu. Příkladem nepřímé metody je Ohmova metoda, jež je vhodná pro měření malých, středních a zároveň velkých elektrických odporů [21].

3.3.3 Dvoubodová metoda

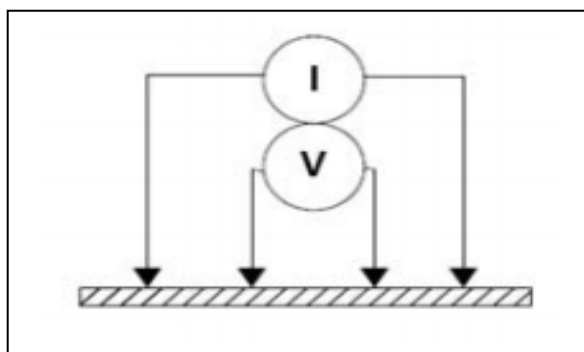
Dvoubodová metoda slouží k měření elektrického odporu materiálů a struktur. Jedná se o jednoduchý princip, kdy je vnější zdroj proudu připojen do měřícího obvodu a odečítá se napětí na dané součásti. Tento nenáročný postup měření je využitý v této bakalářské práci, přesněji v praktické části, při měření vlhkosti a organických par. Další použití této metody je vhodné pro měření velkých odporů ve srovnání s odpory přívodních kontaktů.[22].



Obrázek 8. Schéma dvoubodové metody [22].

3.3.4 Čtyřbodová metoda

Složitější metodou měření elektrického odporu je tzv. čtyřbodová metoda. Základem měření je měřící hlavice se čtyřmi kontakty, dva externí kontakty zaopatřující proudové napájení dané struktury a dva vnitřní kontakty měřící reálnou hodnotu napětí na dané části obvodu. Tato metoda se nejčastěji uplatňuje pro měření malých odporů [22].



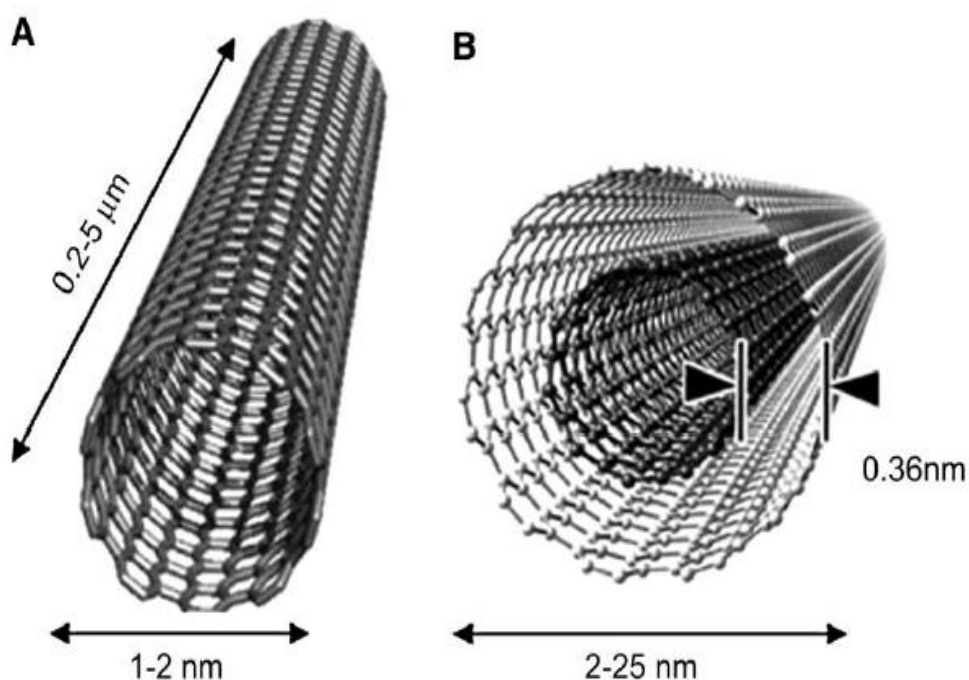
Obrázek 9. Schéma čtyřbodové metody [22].

4 UHLÍKOVÉ NANOTRUBICE (CNT)

Uhlíkové nanotrubičky lze zařadit mezi poměrně nové formy uhlíku, a jak už podle názvu můžeme odvodit, velikostně dosahují rozměrů nanometrů. CNT byly objeveny v roce 1991 japonským fyzikem Sumiem Iijimou, který zkoumal uhlíkový materiál vzniklý při syntéze fullerenů pomocí výboje v elektrickém oblouku, jež bylo pozorováno elektronovým mikroskopem. Tímto objevem se dostaly do podvědomí mnoha vědců a v dnešní době nalézají hodně praktických využití, jako jsou senzory, kompozitní materiály a mnoho dalších aplikací [23].

4.1 Rozdělení uhlíkových nanotrubic

CNT můžeme rozdělit do dvou skupin. První skupinou jsou jedностěnné uhlíkové nanotrubičky (SWCNT), které se vyznačují stočením grafenové vrstvy do tvaru trubičky. Druhou skupinou jsou víceštěnné uhlíkové nanotrubičky (MWCNT), které jsou tvořené z několika grafenových listů, lišící se průměry. Na Obrázku 10. je znázorněn rozdíl mezi jedностěnnými a víceštěnnými uhlíkovými nanotrubicemi.



Obrázek 10. A) Jednostěnná uhlíková nanotrubička, B) Vícestěnná uhlíková nanotrubička [24].

Existuje však i speciální typ CNT, které se skládají ze dvou stěn a nazývají se dvoustěnné uhlíkové nanotrubic (DWCNT). Při jejich vzniku dochází uvnitř jednostěnné uhlíkové nanotrubic k růstu druhé pomocí vloženého fullerenu [25].

4.2 Struktura a vlastnosti uhlíkových nanotubic

Struktura CNT je sestavena do hexagonální mřížky odpovídající grafenovému listu, který je sbalen do tvaru válce. Grafen je tvořen sítí uhlíkových atomů spojených na základě sp^2 vazeb. Vzdálenost vazeb mezi atomy uhlíku dosahuje okolo 0,144 nm a vazebný úhel má hodnotu 120° . CNT jsou charakterizovány jejich délkou, průměrem a chiralitou [26].

CNT se staly atraktivním materiálem na základě jejich aplikací v mnoha oblastech. Jejich elektrické vlastnosti jsou velmi závislé na průměru trubice a chirálním úhlu. Na základě této skutečnosti mohou jednotlivé nanotrubic být vodivé nebo polovodivé a umožňují použití pro konstruování tranzistorů a jejich spojení. Dalšími, neméně důležitými, jsou optické, chemické, mechanické a tepelné vlastnosti [27].

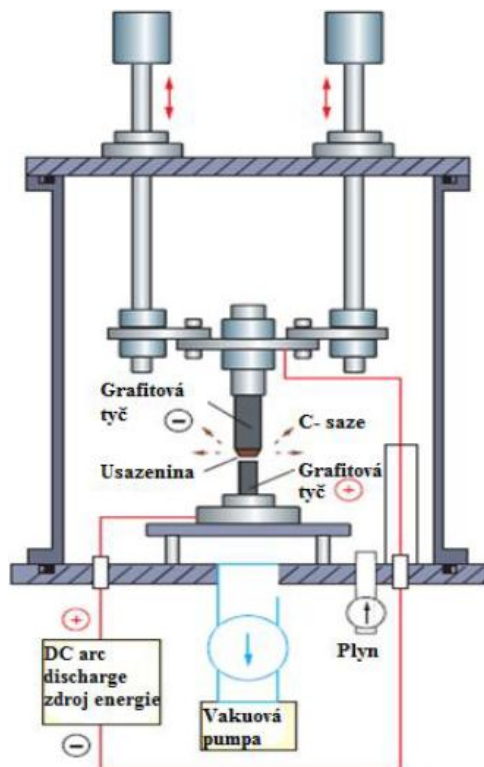
4.3 Výroba uhlíkových nanotubic

V současné době jsou CNT vyráběny mnoha způsoby, ale mezi základní způsoby patří obloukový výboj, laserová ablace a chemická depozice z par. Mezi první metody, které nám umožnily syntézu uhlíkových nanotubic ve větším množství, můžeme označit obloukový výboj a laserovou ablaci.

Obloukový výboj

Tento postup je založen na kondenzaci uhlíkových atomů, které se odpařují z grafitových elektrod a celý systém je v inertní atmosféře. Mezi elektrodami vznikají páry uhlíku, které za přítomnosti katalyzátoru utváří výsledné CNT [28].

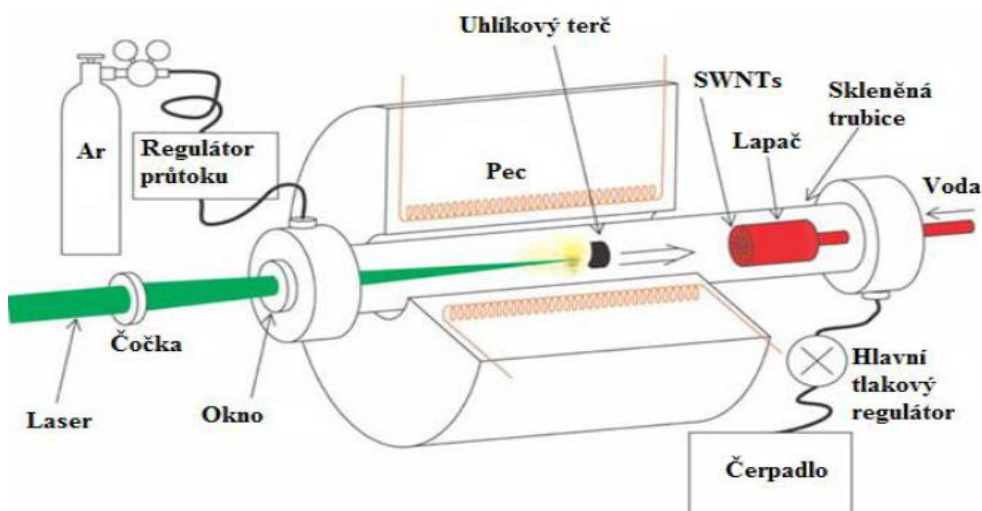
Kvalita a množství CNT závisí na různých parametrech: tlaku inertního plynu, koncentraci kovů z katalyzátoru, druhu plynu, proudu a geometrii systému [28].



Obrázek 11. Schéma aparatury obloukového výboje pro přípravu CNT [29].

Laserová ablace

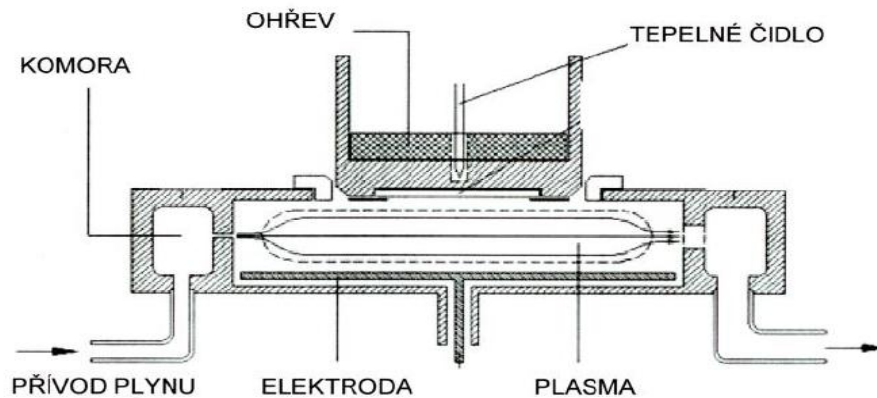
Základem této metody je použití přerušovaného nebo kontinuálního laserového paprsku v trubkové peci. Z toho plyne následná kondenzace uhlíkových atomů odpařujících se z grafitových elektrod. CNT vyrobené laserovou ablaci jsou čistší než CNT vyrobené předchozí metodou a pomocí katalyzátoru lze kontrolovat jejich průměr, avšak cena laserové ablace je poměrně vysoká [28].



Obrázek 12. Schéma aparatury laserové ablace pro přípravu CNT [29].

Chemická depozice z par

Charakteristické pro chemickou depozici z par je rozklad na plynné fáze uhlíkových molekul, které jsou rozštěpené v plazmatu na atomární uhlík. CNT narůstají na vyhřívaném substrátu, který je pokrytý vrstvou kovového katalyzátoru.



Obrázek 13. Schéma aparatury chemické depozice z par pro přípravu CNT [30].

V porovnání s obloukovým výbojem a laserovou ablací umožňuje chemická depozice z par lepší volitelnost výchozích vlastností, ale značnou nevýhodou je množství defektů krystalografické struktury [28].

5 SENZORY

Senzorem je obecně možné nazvat zařízení, které měří určitou vlastnost vnějšího prostředí a následně zasílá informaci o výsledku měření svému vlastnímu systému. V rámci řídicích a informačních systémů bývají senzory považovány za klíčový prvek technických prostředků sloužících pro měření a snímání informací a dat a to z důvodu své schopnosti určovat vlastnosti a činnosti těchto systémů [31,32].

5.1 Historický vývoj a možnosti využití

Stejně jako u mnohých jiných zařízení byl historický vývoj senzorů do značné míry ovlivněn postupným zdokonalováním a prohlubováním znalostí, metod a technologií výroby. U starší generace senzorů, jež byly zpravidla těžší a robustní, byly nejčastěji aplikovány veličiny elektromagnetické a mechanické, přičemž při jejich výrobě byly využívány klasické strojní a elektrotechnické technologie. Uvedené technologie byly dále modernizovány např. tlustovrstvými technologiemi při výrobě vodičů nebo rezistorů. Výrobu a vývoj senzorů do značné míry ovlivnil rovněž rozvoj polovodičových a tenkovrstvých technologií, které umožnily produkovat senzory malých rozměrů, nízké hmotnosti a vysoké přesnosti. Tyto senzory navíc vykazovaly vysokou reprodukovatelnost a nižší náklady pro velkosériovou výrobu. [31]

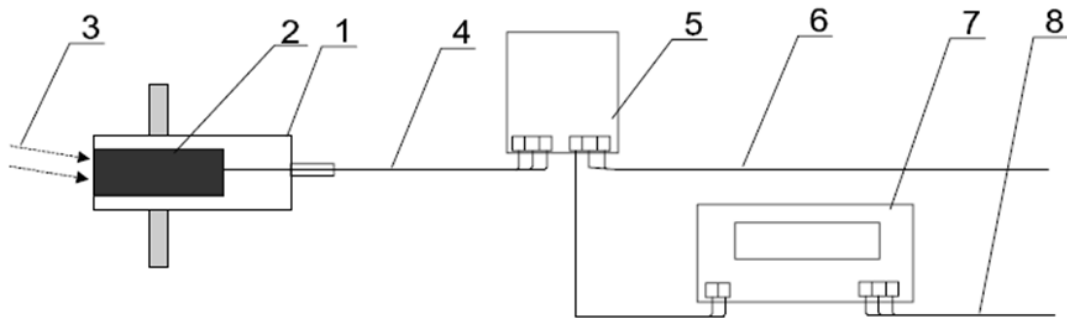
V současné době se senzory uplatňují v široké škále odvětví. Mezi tato odvětví se řadí např. zdravotnictví, zemědělství, potravinářství, biologie, elektrotechnický, chemický či strojní průmysl.

5.2 Podstata fungování senzorů

Základní podstata fungování senzoru, jako primárního zdroje informací, spočívá v jeho snímání měřené fyzikální, chemické nebo biologické veličiny a následné transformaci výsledků měření dle předem definovaného principu.

V obecné rovině je celý měřicí řetězec tvořen snímačem, převodníkem signálu a popřípadě vyhodnocovací jednotkou. Elementárním prvkem snímače je senzor, kde dochází ke snímání nebo převodu podnětu z vnějšího prostředí na měronosný signál. Ve své podstatě tak senzor tvoří primární rozhraní mezi vnějším podnětem a obvody sloužícími pro následující zpracování získané informace. Poslední část snímače pak tvoří mechanická nebo elektronická konstrukce. Primární signál získaný ze senzoru je dále vyhodnocován

elektronickým obvodem, tzv. převodníkem, a převeden na kvantitativní, zpravidla elektrický signál měřené veličiny. Pokud je poté potřeba měřenou veličinu dále zpracovávat, jako například při měření dodávky tepla, slouží k tomu vyhodnocovací jednotka s výstupem. Všechny výše uvedené části měřicího řetězce jsou zobrazeny na Obrázku 14.



1 – snímač; 2 – senzor; 3 – podnět z vnějšího prostředí; 4 – měronosný signál; 5 – převodník;
6 – transformovaný signál; 7 – vyhodnocovací jednotka; 8 – výstup z vyhodnocovací jednotky

Obrázek 14. Schéma měřicího řetězce [31].

Převážná většina senzorů využívá při snímání a převodu podnětů z vnějšího prostředí na výstupní signály elektronické principy, jelikož za pomoci elektroniky lze dosáhnout miniaturizace senzorů, vysoké přesnosti, citlivosti, malé časové konstanty měření, dálkového přenosu signálu apod. Naopak pouze velmi malá část senzorů využívá principy mechanické (tepelná roztažnost látek) nebo tekutinové (pneumatické, hydraulické). Takovéto senzory bývají navíc opatřeny doplňkovým senzorem sloužícím pro převod mechanické změny na elektrický signál [31].

5.3 Druhy senzorů

V oblasti technické praxe a rovněž i vědecké činnosti je možné se setkat s velkým množstvím různorodých senzorů. Tyto senzory je možné členit dle celé řady hledisek:

- *podle měřené, vstupní veličiny:*
senzory teploty, tlaku, průtoku, senzory mechanických veličin, senzory pro analýzy látek, kapalin či plynů, senzory elektrických a magnetických apod.
- *podle výstupní veličiny:*

senzory s výstupem v podobě elektrického signálu, změny optických nebo mechanických veličin, aj.,

- *podle fyzikálního principu:*

senzory odporové, indukční, indukčnostní, kapacitní, magnetické, piezoelektrické, pyroelektrické, optoelektrické, optické vláknové, chemické, biologické,

- *podle styku senzoru s měřeným prostředím:*

senzory bezdotykové a senzory dotykové,

- *podle výrobní technologie*

senzory elektromechanické, mechanické, pneumatické, elektrické, elektrochemické, polovodičové, optoelektronické, mikroelektronické, atd.

V neposlední řadě lze senzory dělit na základě chování výstupu a to na aktivní a pasivní. Aktivní senzory se v případě působení měřené veličiny začnou chovat jako zdroj energie, zatímco u pasivních senzorů dochází působením měřené veličiny ke změně parametrů senzoru, nejčastěji v podobě změny elektrické veličiny (např. indukčnost, kapacita či odpor). Zmíněnou elektrickou veličinu je nezbytné dále transformovat na analogový proudový nebo napětový signál. V případě pasivních senzorů je na rozdíl od aktivních senzorů nutné zajistit napájení [33].

5.4 Senzory pro měření vlhkosti

Hlavním cílem senzorů pro měření vlhkosti je určení množství vodní páry obsažené ve vzduchu, které může být stěžejní pro mnoho výrobních procesů stejně tak jako pro pohodlí lidského života. Měření vlhkosti v průmyslu je kritickou veličinou, zejména kvůli své schopnosti ovlivnit výrobní náklady produktů a zároveň zdraví a bezpečnost pracovníků. Při výrobě senzorů pro měření vlhkosti lze použít keramické, polovodičové a polymerní materiály, za pomoci nichž je možné změřit relativní i absolutní vlhkost [34].

5.4.1 Možnosti uplatnění

Senzory pro měření vlhkosti vykazují v poslední době zvyšující zájem zejména v oblastech průmyslového zpracování a řízení životního prostředí. Své místo však nacházejí tyto senzory také v oblastech každodenního života. Příklady běžných oblastí, činností a zařízení využívajících těchto senzorů jsou zachyceny v Tabulce 3.

Tabulka 3. Možnosti uplatnění senzorů pro měření vlhkosti [34, 35].

Oblast uplatnění	Činnost/Zařízení
Výroba polovodičů	- řízení a monitorování úrovně vlhkosti při zpracování substrátových disků
Zemědělství	- měření vlhkosti půdy a skladovaných obilovin, řízení klimatizace skleníků
Domácnosti	- monitorování a řízení vlhkosti v budovách, kontrola vlhkosti při vaření v mikrovlnných troubách
Automobilový průmysl	- kontrola vlhkosti v elektrických pecích pro vysoušení lepených dílů - využití v rámci systému odmlžování skel automobilů
Zdravotnictví	- kontrola vlhkosti při zpracování farmaceutických a biologických produktů - využití v rámci lékařské techniky - sterilizátorů, inkubátorů, respirátorů
Ostatní	- kontrola vlhkosti při čištění chemických plynů, produkci papíru a textilu, zpracování potravin a léků, měření vlhkosti dřeva a stavebních materiálů

5.4.2 Charakteristika vlhkosti

Vlhkost je považována za důležitou charakteristickou vlastnost plynů. Obecně se při měření vlhkosti určuje množství vodní páry obsažené v plynu, kterým může být vzduch nebo také čistý plyn jako např. vodík, dusík nebo argon. Na základě měřících technik jsou standardně používanými způsoby vyjádření vlhkosti relativní vlhkost, rosný bod a vyjádření v jednotkách PPM (z angl. termínu Parts Per Million vyjadřujícího poměr počtu částic dané substance k jednomu miliónu) [34].

Relativní vlhkost

Relativní vlhkost je nejčastěji používaná charakteristika vlhkosti plynů a je definována jako poměr mezi skutečným množstvím vodní páry vyskytující se v plynu a množství vodní páry plně nasyceného plynu při stejné teplotě a tlaku. Jedná se o bezrozměrovou veličinu, která se standardně udává v procentech a pohybuje se v rozmezí od 0 % do 100 %, přičemž relativní vlhkost 100 % znamená, že při dané teplotě již plyn nemůže pojmout více vodní páry [34, 36].

Rosný bod

Rosný bod se řadí mezi absolutní způsoby vyjádření vlhkosti a udává teplotu, při které je plyn maximálně nasycen vodní párou. V případě poklesu teploty pod tento bod dochází

ke kondenzaci neboli skupenské přeměně plynu na kapalinu a vzniká např. rosa nebo mlha. Při dané teplotě může plyn obsahovat pouze určité množství vodní páry. Čím je teplota plynu a tedy i vodní páry vyšší, tím více páry se může nacházet v jednotce objemu, aniž by docházelo ke kondenzaci [34, 36].

Jednotky PPM

V neposlední řadě lze pro měření vlhkosti v absolutním podání využít jednotky PPM vyjadřující množství vodní páry na základě objemového podílu (PPMv – Parts per Million by Volume) nebo množství vodní páry na základě hmotnostního podílu (PPMw – Part per Million by weight). Uvedeného hmotnostního podílu se dosáhne pomocí vynásobení poměru molární hmotnosti vody a daného plynu [34].

5.4.3 Senzory pro měření relativní vlhkosti

Podle způsobu vyjádření vlhkosti se senzory pro měření vlhkosti dělí na senzory měřící relativní vlhkost a senzory měřící vlhkost absolutní. Převážná většina senzorů vlhkosti jsou senzory relativní vlhkosti. Jelikož senzory pro měření absolutní vlhkosti nejsou v bakalářské práci využívány, není jim již dále věnována pozornost.

Senzory pro měření relativní vlhkosti mohou být klasifikovány pomocí transdukčního schématu, jež využívají k převodu koncentrace vodní páry na elektrický signál, na senzory:

- kapacitní,
- odporové (pracující se stejnosměrným nebo střídavým proud),
- moderní odporové (piezodporové) [37].

Odporové senzory reagují na změnu vlhkosti změnou vodivosti, zatímco kapacitní senzory reagují na vlhkost změnou relativní permitivity.

Klíčovým prvkem v rámci senzorů pro měření relativní vlhkosti, zejména z hlediska efektivity nákladů, je použití pevných filmů nebo vrstev, které reagují s vodní párou a dovolují provést opakovatelná elektrická měření. Samozřejmostí je existence i jiných typů senzorů pracujících například na optickém principu, které však kvůli svým výrobním nákladům a složitosti nejsou příliš používány.

Proces přeměny množství vodní páry v následné elektrické měření za pomoci snímacích filmů se skládá ze tří částí:

- fyzikální a chemická interakce molekul s povrchem filmu,
- modifikace povrchu i celého filmu způsobena nashromážděním vodní páry a její pronikání do filmu,
- elektrické měření elektrické nebo mechanické vlastnosti filmu, jenž se mění na základě interakce s vodní párou.

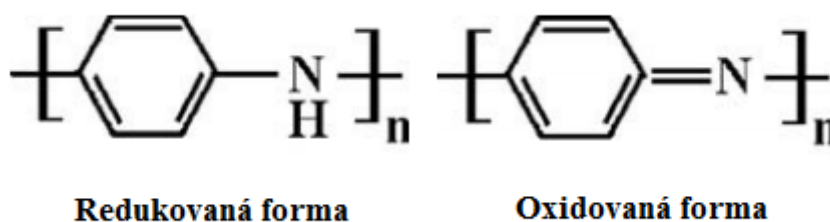
Ideální film schopný snímat vlhkost by měl mít vysokou citlivost na vodní páru s lineární odezvou od 0 % do 100% relativní vlhkosti, krátkou dobu odezvy, vysokou selektivitu a dlouhodobou stabilitu. Filmy jsou zpravidla připravovány z polymerních, keramických nebo polovodičových materiálů [34, 37].

5.4.4 Využití vodivých polymerů v rámci senzorů pro měření vlhkosti

Vodivé polymery představují makromolekuly, ve kterých se pravidelně opakují jednoduché, nebo dvojné vazby. Tyto konjugované vazby tvoří klíčový prvek vodivých polymerů, kterým je v posledních letech věnována značná pozornost v průmyslu i v rámci laboratorních výzkumů. Samotné vodivé polymery nejsou ve skutečnosti příliš vodivé kvůli nedostatku volných nosičů náboje. Vodivost těchto polymerů může být výrazně vylepšena dopováním, pomocí něhož dochází k oxidaci (p-typ dopování) nebo redukci (n-typ dopování) hlavního řetězce [34].

Většina senzorů pro měření vlhkosti vyrobených z vodivých polymerních materiálů funguje na principu porézního polymerního filmu tenčího než milimetr, který obsahuje mikropóry pro kondenzaci vodní páry, přičemž během absorpce vody tímto filmem dochází ke změně měřitelných fyzikálních vlastností. Voda je dobře známa pro její protonaci, přičemž uvolněné protony reagují s univerzálně konjugovanými C = C dvojnými vazbami. Tento efekt je používán pro snímání vlhkosti [34, 38].

Mezi mnohými dalšími vodivými polymery byl PANI shledán jako polymer dlouhodobě citlivý na vlhkost. Důsledkem polymerace některým ze silných oxidantů, např. $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$, obsahuje struktura PANI dvě základní formy, a to neoxidovanou (redukovanou) a oxidovanou, viz Obrázek 15. [34, 38].



Obrázek 15. Základní formy struktury PANI po polymeraci [34].

PANI syntetizovaný tímto způsobem může být považován za p-typ dopování. Kvůli nevázanému elektronovému páru na atomu dusíku, lze obě formy protonovat: $-\text{NH}- \rightarrow -\text{NH}_2^+-$ a $-\text{N}= \rightarrow -\text{NH}^+=$. Přenos elektronů (mezimolekulové přeskoky) z protonované redukované formy ($-\text{NH}_2^+$) do protonované oxidované formy ($-\text{NH}^+=$) je považován za dominantní proces vodivosti PANI, v případě kdy obsah vody dosáhne 0,1% (molární poměr). Jelikož je v tomto procesu proton přenášen do molekuly vody reakcí, $-\text{NH}_2^+- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow -\text{NH}^+= + \text{H}_3\text{O}^+$, je absorbovaná voda významným prvkem vodivosti. Schopnost PANI snímat vodní páru lze považovat za výsledek mezimolekulového přeskočného výměny protonů [34].

Téměř všechny polymerní senzory pro měření vlhkosti pracují při pokojové teplotě, což je způsobeno jejich vysokou citlivostí na teplo.

5.5 Senzory pro měření plynů a par

Současné období je charakteristické mnohými složitými technologickými procesy sloužícími mimo jiné pro výrobu přístrojů, součástek, materiálů nebo chemických sloučenin. Při výrobě a práci s posledně jmenovanými, chemickými sloučeninami, dochází běžně k různorodým chemickým reakcím, které mohou být zdrojem vedlejších produktů v plynném skupenství. Do ovzduší se mohou rovněž uvolnit páry kapalných látek, a to odpařováním, nebo pevných látek, a to sublimací. Mnohé z těchto vedlejších produktů jsou zdraví škodlivé a při práci s těmito látkami je nezbytná správná ventilace nebo filtrace. Zároveň je žádoucí, aby byl správný stav ovzduší pravidelně monitorován a kontrolován na výskyt koncentrace škodlivých produktů. V některých situacích jsou navíc kladeny požadavky na monitorování bezprostředního okolí daného člověka.

Pro monitorování stavu okolního prostředí slouží senzory plynů a par. Stejně jako u jiných typů senzorů se tyto senzory dají dělit dle mnohých charakteristik. Z hlediska detekce přítomnosti určité látky v ovzduší jsou to senzory indikující překročení stanovené hladiny

této látky a senzory detekující koncentraci této látky. Dle snímacího materiálu lze senzory dělit na senzory se snímacím materiálem tvořeným z anorganických látek a na senzory, jejichž snímací materiál je složen z látek organických [39].

Stejně jako u převážné většiny senzorů je základní princip senzorů schopných detekce plynů a par založen na změně elektrických vlastností. Tento princip se uplatňuje také u senzorů pro měření organických par, které budou blíže přiblíženy v následujícím textu.

5.5.1 Organická rozpouštědla

Organická rozpouštědla jsou látky těkavé a toxické, a tudíž mají škodlivý vliv na živé organismy i životní prostředí. Těkavost je pojmem označujícím schopnost látky (zpravidla v kapalném skupenství) vypařovat se. Tento pojem značí nejvyšší tlak, při kterém může existovat látka v rovnovážném plynném stavu za dané teploty a zároveň nejnižší tlak, při němž může existovat látka v kapalném stavu, opět za dané teploty. Obecně platí, že látky s vyšší tenzí par se vypařují rychleji než látky s nižší tenzí par [40].

Toxicita neboli jedovatost je charakterizována jako vlastnost chemických sloučenin vyvolat škodlivý účinek. Podle sedmistupňové škály toxicity se chemické látky dělí na:

- prakticky netoxické (BaSO_4),
- málo toxické (ethanol),
- mírně toxické (NaCl),
- silně toxické (methanol),
- extrémně toxické (BaCO_3),
- supertoxické (botulotoxiny) [41].

Uplatnění organických rozpouštědel lze nalézt v široké škále odvětví a činností, mezi něž se řadí např. chemický průmysl, výroba a zpracování plastů, ředění barev, čištění kovů a textilií nebo výroba průmyslových přípravků, jakými jsou nátěrové hmoty či lepidla [42].

V mezinárodní terminologii se látky typu organických rozpouštědel standardně vyskytují pod zkratkou VOCs (volatile organic compounds). Tato rozpouštědla se podle chemického složení dělí na:

- alkoholy,
- uhlovodíky,
- glykol étery,
- chlorovaná rozpouštědla,

- ketony,
- étery,
- estery
- ostatní rozpouštědla [43].

5.5.2 Senzory pro měření organický par

Senzory pro měření organických par transformují koncentrací organických par na jiný měřitelný signál. Po kontaktu s párou organických rozpouštědel dochází k reakci mezi snímacím materiálem senzoru a párou, která způsobuje změny fyzikálních vlastností snímacího materiálu [44].

Vysoká citlivost a selektivita patří mezi žádané vlastnosti těchto senzorů, a to z důvodu snadného a rychlého odhalení toxických látek, např. v průmyslových odvětvích. Tak jako u jiných typů senzorů existuje i v případě senzorů pro měření organických par celá řada dalších důležitých vlastností, které jsou považovány za klíčové pro kvalitní a účinné fungování snímacího systému. Patří zde rychlá časová odezva, krátká doba regenerace, dlouhodobá stabilita, schopnost měření nízké koncentrace organických par, nízká provozní teplota a teplotní nezávislost [45].

V praxi se pro snímání koncentrace organických par používají materiály na bázi vodivých polymerů, polovodivé oxidy kovů nebo porézní křemík.

5.5.3 Využití vodivých polymerů v rámci senzorů pro měření organických par

Vodivé polymery, jakými jsou polypyrrol, PANI a jejich deriváty jsou využívány jako aktivní vrstvy plynových senzorů již od 80. let 20. století. Ve srovnání s většinou běžně dostupných senzorů na bázi oxidů kovů vykazují senzory vyrobené z vodivých polymerů mnoho výhodnějších vlastností. Mezi tyto vlastnosti se řadí vysoká citlivost, krátká doba odezvy (vlastnosti vykazované zejména při běžné pokojové teplotě) nebo lehká příprava skrze chemické nebo elektrochemické procesy [44, 46].

Obecně mohou být organické páry vzájemně reagující s vodivými polymery rozděleny do dvou hlavních tříd a to na páry, které s vodivými polymery chemicky reagují a na páry, které se na vodivých polymerech adsorbují. Chemické reakce obecně vedou ke změně v úrovni dopování vodivých polymerů a mění tak jejich fyzikální vlastnosti, např. odpor. Při adsorpci může docházet k bobtnání vodivých polymerů a také následnému zvyšování odporu [44, 47].

Vědecky bylo dokázáno, že citlivostní vlastnosti vodivých polymerů na organické páry záleží jak na složení polymeru, tak na povaze organické páry. Citlivost senzoru je dále do značné míry závislá na vlhkosti okolního prostředí, jelikož vodní pára může významně ovlivnit měření pomocí senzoru organických plynů [48, 49].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍL PRÁCE

Cílem experimentu bylo připravit polyanilin ve dvou formách, lišící se svojí strukturou. Oba druhy PANI, a to PANI ve formě granulí a PANI ve formě nanovláken, byly využity při měření relativní vlhkosti, která se stupňovitě zvedala a v této závislosti se měnila jejich senzitivita. Následně byly měřené sítě CNT v porovnání s PANI ve formě granulí pro odezvy organických par, jelikož byla zjišťována jejich selektivita. Tyto dva materiály byly současně vkládány do par pěti různých organických rozpouštědel. Tímto jsme získali skupinu dvou senzorů pro detekci určitých organických par.

Pomocí dvoubodové metody měření elektrického odporu pro detekci vlhkosti a organických par byla zjištěna senzitivita u všech použitých materiálu.

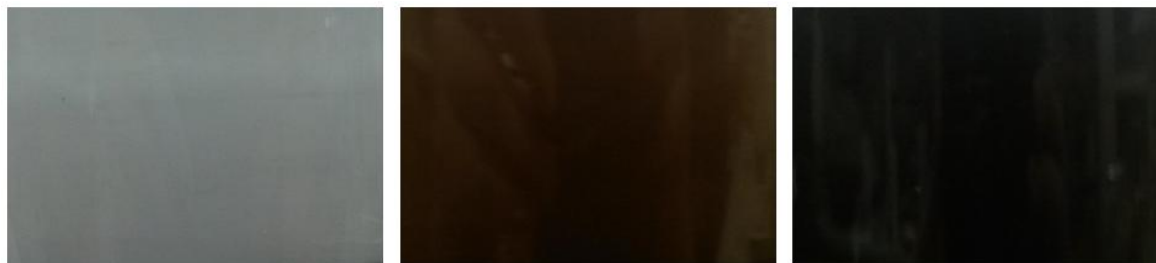
7 SYNTÉZA VZORKŮ

7.1 Příprava PANI

Byly připravené dva typy vzorků, a to PANI ve formě granulí a PANI ve formě nanovláken.

7.1.1 PANI ve formě granulí

První typ PANI ve formě granulí, který se používal pro měření vlhkosti a na odezvy organických par, byl připraven smíšením 50 ml destilované vody s 1,29 g anilinu hydrochloridu v kádince (100 ml). Do této směsi bylo vloženo míchadlo, PET fólie, na které se během polymerace vytvoří PANI film, a nakonec se přidalo 1,56 g APS rozpuštěné v 50 ml destilované vody. Kádinka s roztokem byla umístěna na magnetický míchací přístroj, kde byla ponechána 24 hodin při rychlosti míchání 500 ot./min. Po dvacetičtyřhodinovém míchání se vytvořil PANI film na PET fólii, která se opláchla vodou a nechala se vysušit při pokojové teplotě.



Obrázek 16. Průběh polymerace PANI ve formě granulí.

7.1.2 PANI ve formě nanovláken

Druhý typ PANI ve formě nanovláken se používal na odezvy organických par. Stejně objemy (25 ml) 0,2 M anilinu v 1 M HCl a 2,2 g $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ v 1,0 M HCl bylo smícháno dohromady. Roztok připravený v kádince, obsahující míchadlo a PET fólii, byl vložen na magnetický míchací přístroj, kde byl ponechán 24 hodin při rychlosti míchání 500 ot./min. Po uplynutí stanoveného časového intervalu se vytvořil na PET fólii velmi tenký PANI film, tento PANI film se opláchl vodou a sušil se při pokojové teplotě.



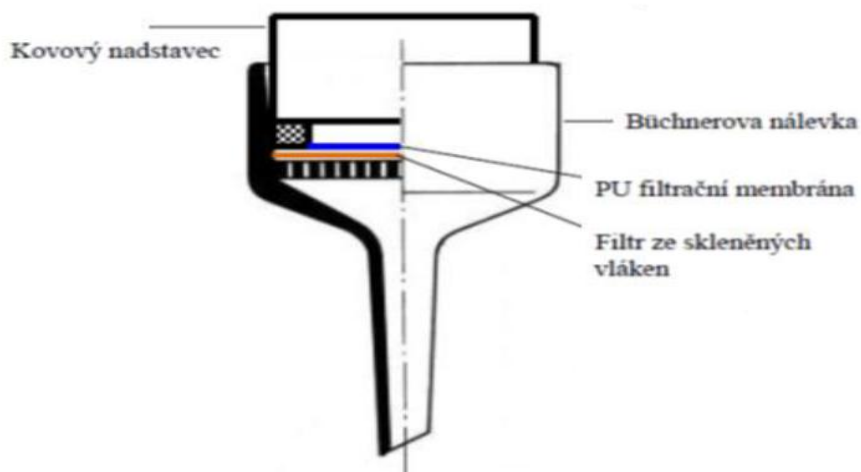
Obrázek 17. Průběh polymerace PANI ve formě nanovláken.

7.2 Příprava sítě CNT

Příprava CNT, které se používaly pouze na odezvy organických par, probíhala smíšením:

- 530 ml destilované vody,
- 8 ml pentanolu,
- 15 ml 1M NaOH,
- 1,6 uhlíkových trubic,
- 15,4 g SDS.

Z připraveného roztoku se odebralo 250 ml a nechalo se filtrovat přes PU membránu, za použití Büchnerovy nálevky a podtlaku. Po dokončení filtrace byla PU membrána, na které vznikla síť uhlíkových nanotrubic, šetrně sundána a vše se dalo sušit mezi dva filtrační papíry.

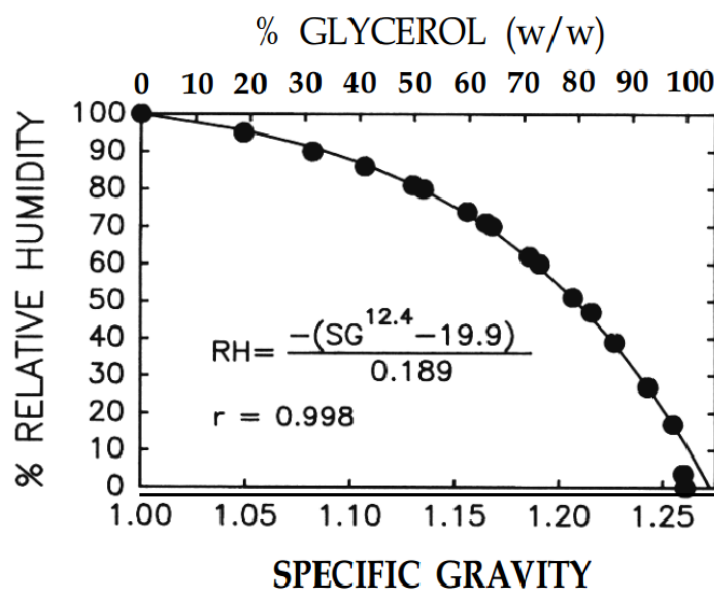


Obrázek 18. Schéma napnutí PU membrány na nadstavec.

7.3 Řízená relativní vlhkost (RH) za použití roztoku glycerol-voda

Roztok glycerolu a vody je vhodný a nenákladný systém pro řízení relativní vlhkosti. Tento systém počítá s vytvořením přesné a rovnoměrné odstupňování série RH, která byla využita v této práci, kdy bylo připraveno 10 roztoků glycerol-voda od 10 % RH do 100 % RH.

Vztah mezi koncentrací glycerolu, měřeného jako SG a rovnováhy RH je znázorněn na Obrázku. 19.



Obrázek 19. Vztah měrné hmotnosti (SG) a obsah glycerolu v roztoku glycerol-voda.

Rovnováha RH se pomalu snižuje, tak jak se zvyšuje obsah glycerolu. Větší změna nastává, když obsah glycerolu přesáhne ~ 70 %. Nižší změna RH nastává, když je obsah glycerolu < 70 %. Pro účely podpory určení potřebného roztoku k produkci požadované RH je zaveden vzorec z Obrázku 19. pro řešení SG:

$$SG = [-0,189(RH) + 19,9]^{0,0806} \quad (2)$$

kde RH je požadované procento relativní vlhkosti a SG je měrná hmotnost roztoku glycerolu a vody potřebná k vytvoření této RH. Poměr vody a glycerolu potřebný k produkci požadovaného SG může být odhadnut z Obrázku 19. nebo počítán z rovnice:

$$G_w = 383 (SG) - 383 \quad (3)$$

kde G_w je procento glycerolu dáno váhou v roztoku. Množství glycerolu a vody potřebného pro přípravu roztoku může být počítáno pomocí použití vzorců:

$$G_v = (G_w \cdot WT) / (100 \cdot 1,262) \quad (4)$$

kde G_v je množství glycerolu (ml), WT je celková váha roztoku (g) a $1,262 \text{ (g.cm}^{-3}\text{)}$ je hustota čistého glycerolu při $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Množství vody může být vypočítáno pomocí rovnice:

$$H_v = [(100 - G_w) \cdot WT] / (100 \cdot 1,0) \quad (5)$$

kde H_v je množství vody (ml) a $1,0 \text{ (g.cm}^{-3}\text{)}$ je hustota vody.

Roztoky glycerolu a vody mají mnoho výhod pro použití při řízení RH. Roztoky složené z 0 % do 100 % glycerolu mohou být lehce míchány a jejich přesné složení může být určeno za použití měrné hmotnosti (SG). Roztoky glycerolu jsou méně žíravé než například roztoky kyseliny sírové a také ekonomicky výhodnější [50].

7.4 Tlaky nasycených par a objemové podíly

Rovnice (6) byla využita při výpočtu tlaků nasycených par a objemových podílů pro pět rozpouštědel použitých při detekci organických par.

$$x_i = p_i / p_A \quad (6)$$

kde x_i je objemový podíl daného rozpouštědla (obj. %), p_A značí atmosférický tlak (kPa) a p_i je tlak nasycených par při $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (kPa) [51].

VÝSLEDKY A DISKUZE

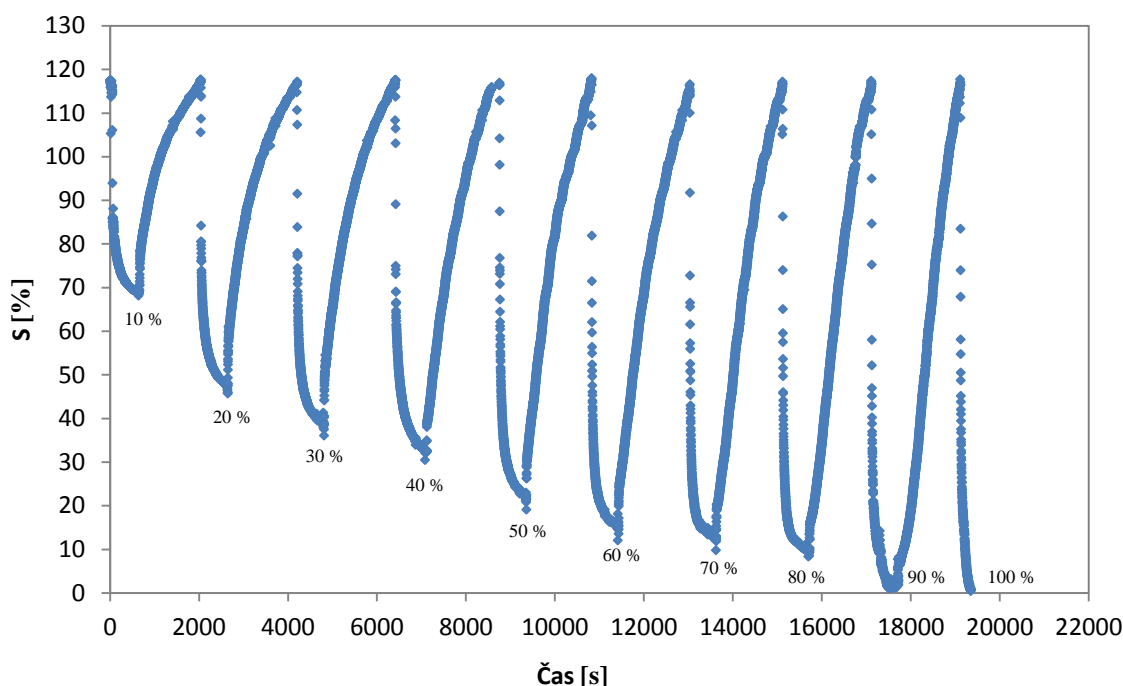
7.5 Odezvy na vlhkost

7.5.1 Měření relativní vlhkosti

Pro měření vlhkosti, probíhající při 25 °C, byly dokonale vysušené vzorky PANI ve formě granulí a PANI ve formě nanovláken nastříhány na proužky o rozměrech cca 20 x 5 mm. Poté byly pevně přichyceny na měřicí systém a následně vloženy do par HCl po dobu 5 minut, kde se snížil počáteční elektrický odpor. Dále byl vzorek střídavě po 10 minutách vkládán do par H₂SO₄ s 0 % RH a následně do RH, která se stupňovitě zvedala z 10 % na 100 %. Následně byl elektrický odpor, měřený pomocí dvoubodové metody, přepočítán na senzitivitu (S) podle vztahu:

$$S = (R/R_0 - 1) \cdot 100 \quad (7)$$

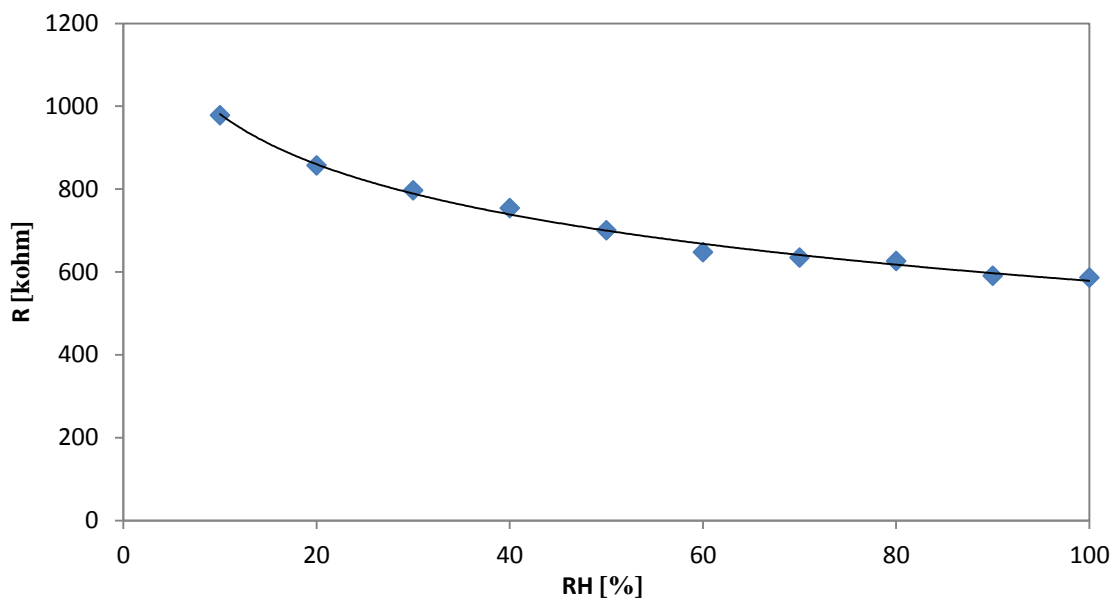
kde S je senzitivita (%), R vyjadřuje elektrický odpor (Ω), R₀ značí počáteční elektrický odpor (Ω).



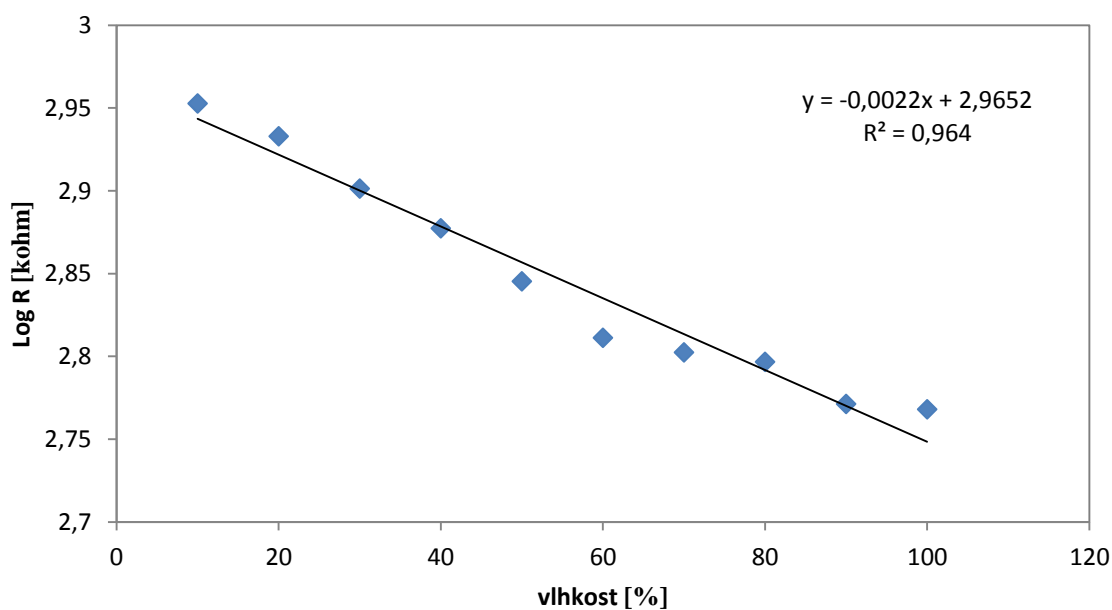
Obrázek 20. Závislost S (senzitivita) na čase pro materiál PANI ve formě granulí při měření vlhkosti.

Výsledek měření vlhkosti je znázorněn na Obrázku 20. Vložením vzorku PANI ve formě granulí do vlhkosti dochází k adsorpci molekul vody a tím se snižuje

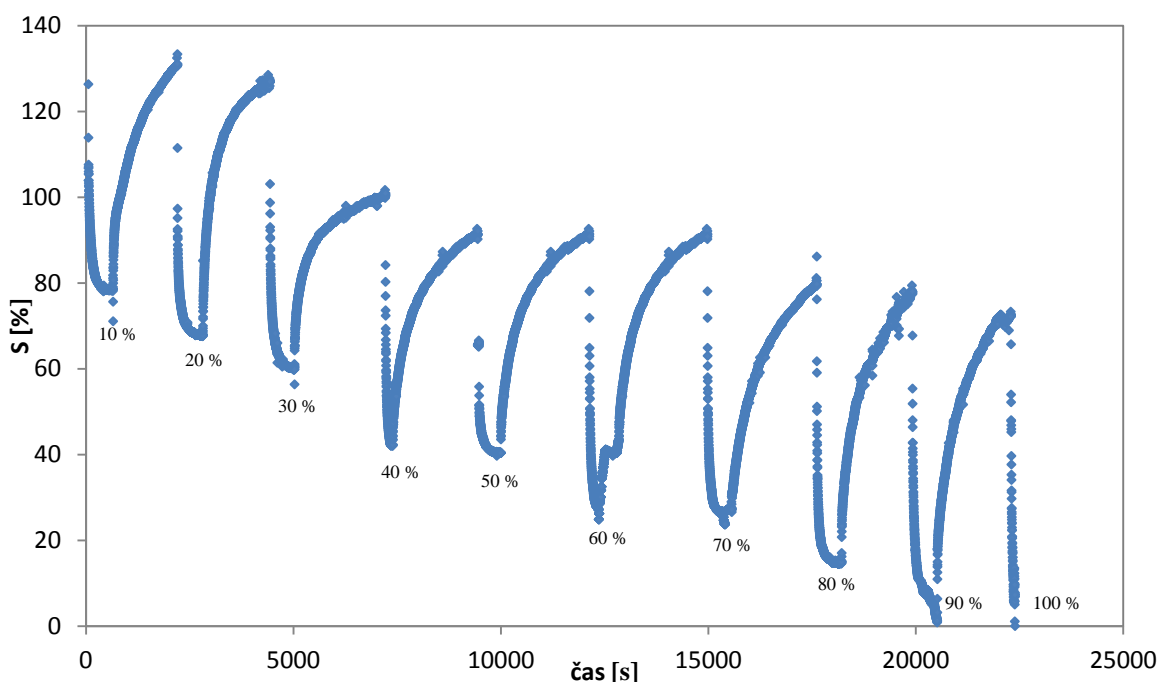
elektrický odpor a zvyšuje se vodivost. Po uplynutí časového intervalu byl vzorek PANI vrácen zpět do H_2SO_4 , kde došlo k desorpci molekul vody a zvýšení elektrického odporu. Vše se projevilo v senzitivě (citlivosti), která je vyjádřena v procentech. Z grafu je vidět, že proces je vratný.



Obrázek 21. Závislost elektrického odporu na relativní vlhkosti.

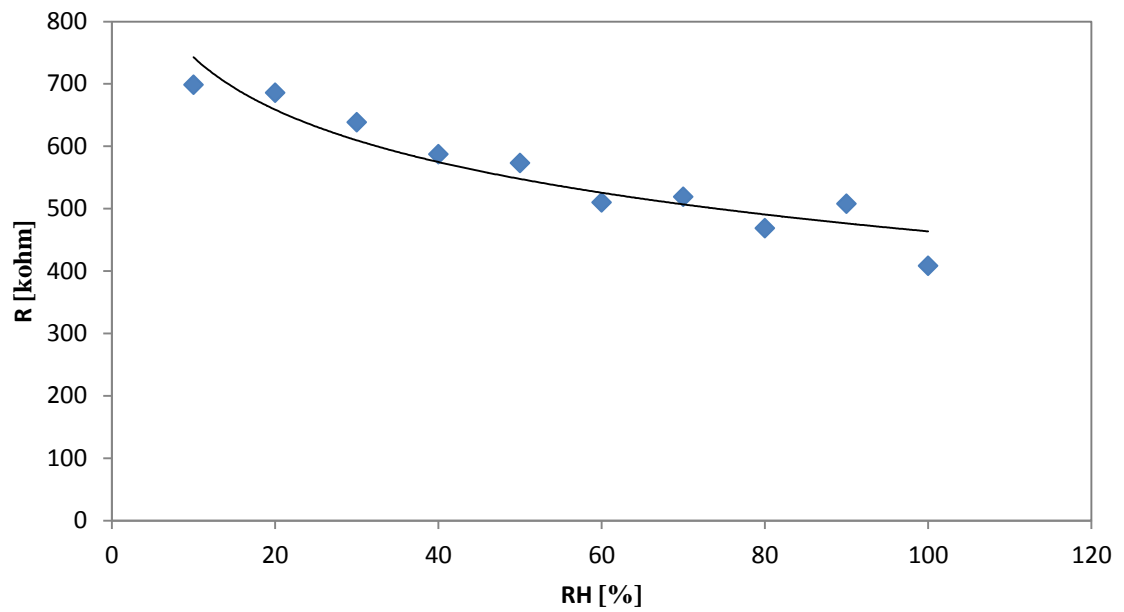


Obrázek 22. Závislost zlogaritmovaného elektrického odporu na relativní vlhkosti.

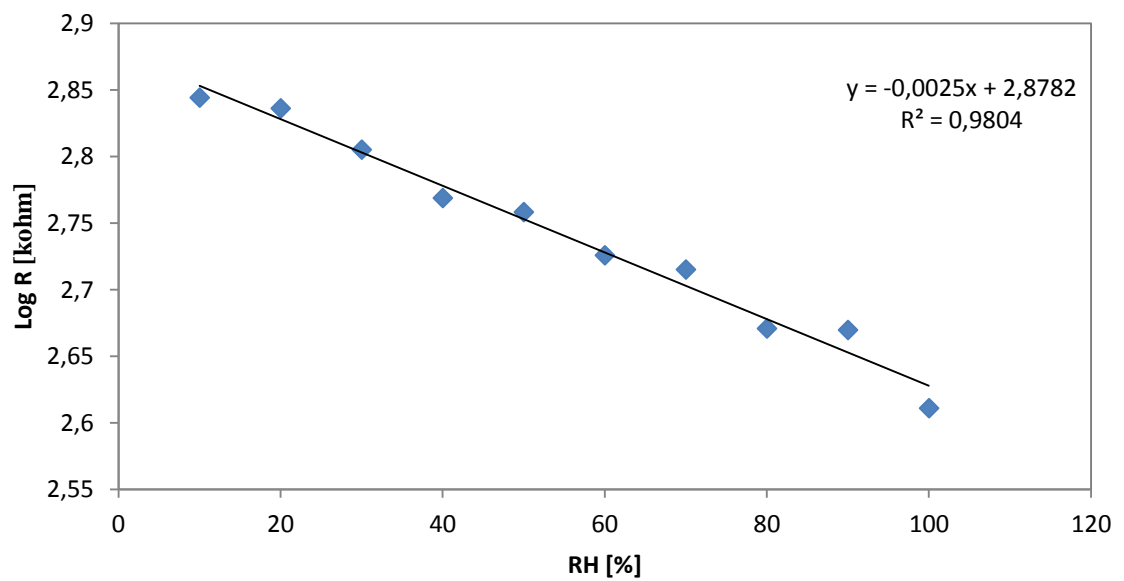


Obrázek 23. Závislost S (senzitivita) na čase pro materiál PANI ve formě nanovláken při měření vlhkosti.

Měřením stupňovité vlhkosti byla zjištěna senzitivita pro vzorek PANI ve formě nanovláken, zobrazeno na Obrázku 23. Vložení PANI do vlhkosti dochází k zmenšení elektrického odporu a tím se zvyšuje vodivost. Opačně vzorek reaguje, když se vloží zpět do H_2SO_4 . Oproti PANI ve formě granulí, který se dokázal vrátit zpět na svoji původní hodnotu senzitivity v H_2SO_4 za určitý čas, se PANI ve formě nanovláken nedocházelo navrátit na počáteční hodnotu senzitivity (127%), zapříčiněno nedostatečným časem. Mohlo to být způsobeno vysokou adsorpcí molekul vody, když byl vzorek ve vlhkosti, a následnou desorpcí v H_2SO_4 , která neproběhla dostatečně.

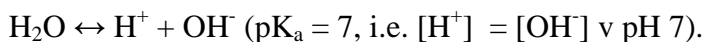


Obrázek 24. Závislost elektrického odporu na relativní vlhkosti.



Obrázek 25. Závislost zlogaritmovaného elektrického odporu na relativní vlhkosti.

Zvýšení vodivosti PANI filmu za přítomnosti vlhkosti bylo způsobeno protonovým efektem. Molekuly vody jsou ionizované a disociují na kationt vodíku (H^+) a hydroxylové ionty (OH^-):

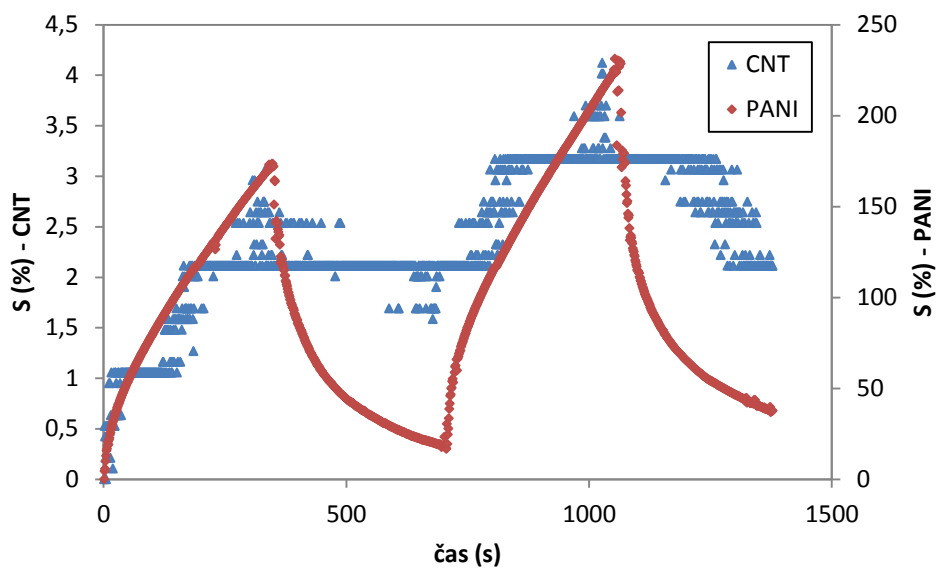


Při daném pH tato vratná chemická reakce rychle nastolí rovnováhu, ale tato rovnováha rovněž ovlivněna jejím okolním prostředím. Nachází se tam mnoho míst s nábojem a H-vazeb ($-NH-$, $-N=$, $=NH^+-$, $-NH_2^+-$) v rámci PANI emeraldinové formě. Tyto kladná nebo polární místa by pomohly k posunu rovnováhy směrem k utváření protonu přes nabitě interakce a H-vazby. Následně se molekuly vody absorbované do PANI chovají jako zdroj protonu, který může buď zvyšovat úroveň dopování polymeru, nebo může vést samotný náboj přes síť absorbovaných molekul vody. H-vazba mezi polymerními řetězci bývá považována jako faktor přispívající ke zvýšení vodivosti [35].

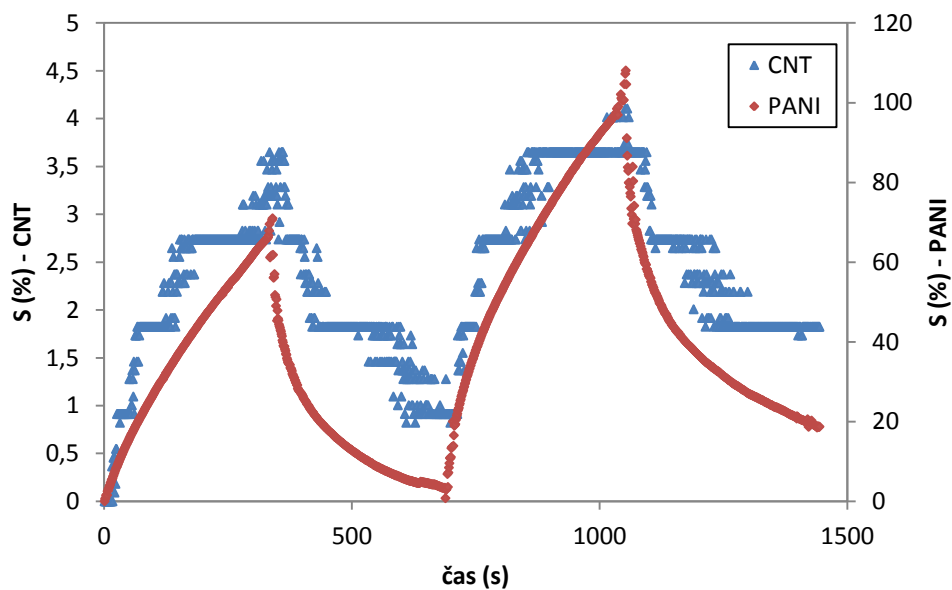
7.6 Odezvy na organické páry

7.6.1 Měření organických par

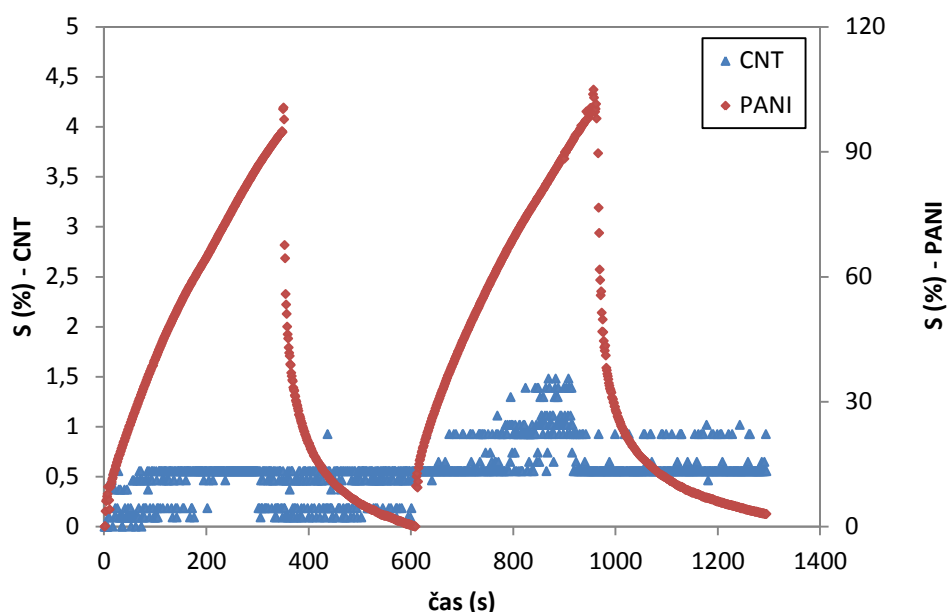
Pro odezvy organických par se použilo pět různých rozpouštědel, a to DMF, DMAC, DMSO, heptan a etanol. Měření probíhalo při 25 °C. Vzorek PANI ve formě granulí se nastříhal na proužky o rozměrech přibližně 20 x 5 mm a následně se pevně umístil na měřicí systém. Poté byl vzorek vložen do par HCl, opět po dobu 5 minut. Dalším krokem bylo vložení vzorku do organického rozpouštědla po dobu 6 minut a poté byl vyjmutý na vzduch a tam byl ponechán zase 6 minut. Tento cyklus se opakoval ještě jednou. Dohromady byly naměřené 2 cykly. U CNT příprava a měření probíhalo stejným způsobem s jedním rozdílem, že se měřicí systém se vzorkem nekládal do par HCl, ale rovnou do připravených par rozpouštědla. V obou případech, jak pro CNT, tak pro PANI, byl měřený elektrický odpor, který se následně přepočítal na senzitivitu (S), viz rovnice (7) a oba zmíněné vzorky byly vkládány do organických par rozpouštědel současně.



Obrázek 26. Závislost S (senzitivita) na čase pro CNT a PANI vložených do organické páry DMF.



Obrázek 27. Závislost S (senzitivita) na čase pro CNT a PANI vložených do organické páry DMAC.

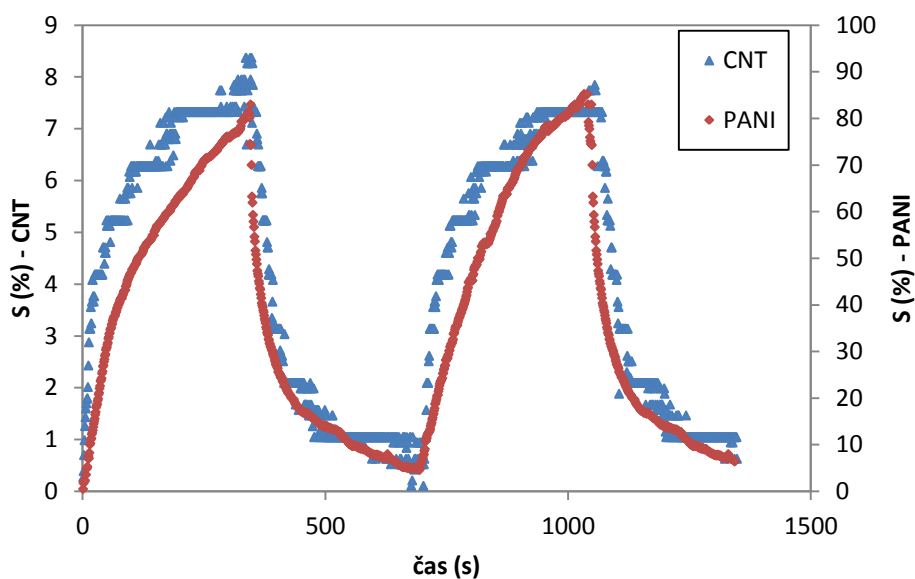


Obrázek 28. Závislost S (senzitivita) na čase pro CNT a PANI vložených do organické páry DMSO.

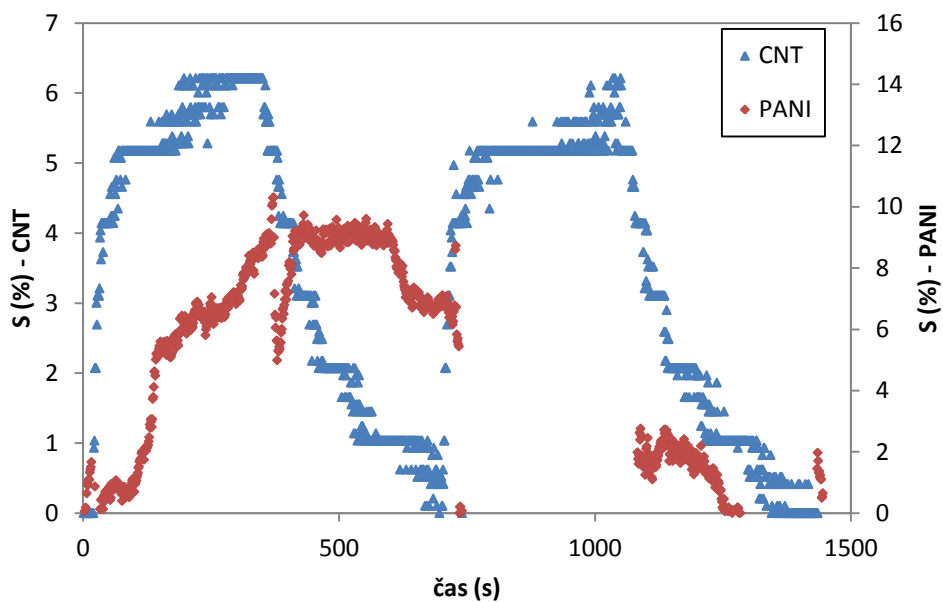
Měřením byla zjištěna senzitivita používaného materiálu PANI ve formě granulí a CNT vkládaných do par DMF, DMAC a DMSO. PANI vykazoval vysoký nárůst elektrického odporu po vložení do organických par, příčinou může být dobrá interakce PANI s rozpouštědly. Změna senzitivity PANI ve srovnání s CNT je vysoká, jelikož CNT reagovalo s párami organických rozpouštědel velmi málo, jak je znázorněno v Tabulce 4.

Tabulka 4. Senzitivita jednotlivých materiálů.

Rozpouštědlo	PANI ve formě granulí	CNT	Nasycené tlaky par při 20 ° C	Objemové podíly
DMF	231,29%	4,12%	0,36 kPa	0,36 obj. %
DMAC	107,26%	4,11%	0,20 kPa	0,20 obj. %
DMSO	103,83%	1,48%	0,05 kPa	0,05 obj. %



Obrázek 29. Závislost S (senzitivita) na čase pro CNT a PANI vložených do organické páry etanolu.

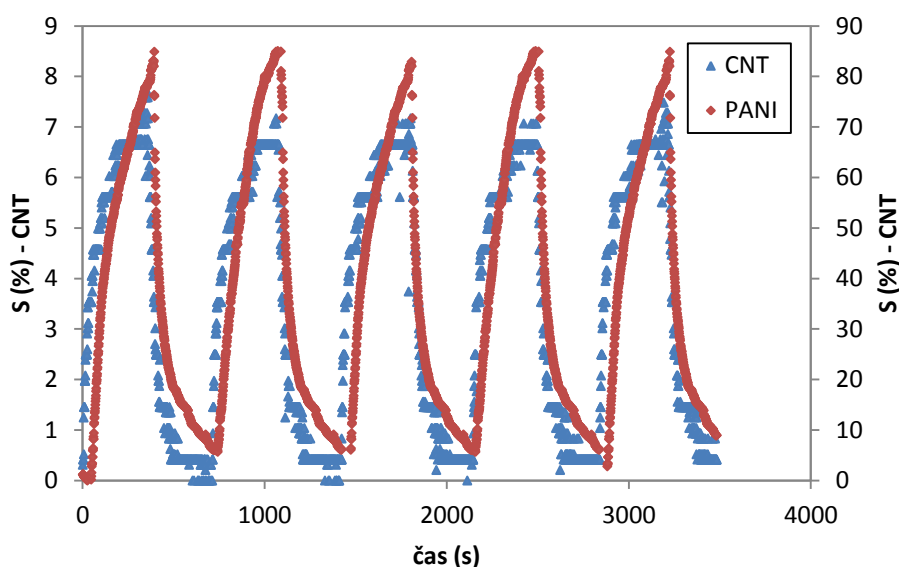


Obrázek 30. Závislost S (senzitivita) na čase pro CNT a PANI vložených do organické páry heptanu.

Z Obrázků 29. a 30. můžeme vidět rozdíl senzitivity mezi CNT a PANI po vložení do organických par etanolu a heptanu. CNT vykazuje nízkou změnu senzitivity, dochází ke zvýšení elektrického odporu a k adsorpci molekul par. Vzorek PANI na páry heptanu téměř nereaguje, může to být způsobeno nepolárností toho rozpouštědla, ostatní použité rozpouštědla jsou polární. Nasycené tlaky par a odpovídající objemové podíly se také podílí na citlivosti těchto materiálů. Oba materiály vykazují různé odezvy pro organické páry, což dáno jejich citlivostí.

Tabulka 5. Senzitivita jednotlivých materiálů.

Rozpouštědlo	PANI ve formě granulí	CNT	Nasycené tlaky par při 20 ° C	Objemové podíly
Etanol	84,23%	8,00%	5,95 kPa	5,87 obj. %
Heptan	10,28%	6,21%	5,33 kPa	5,26 obj. %

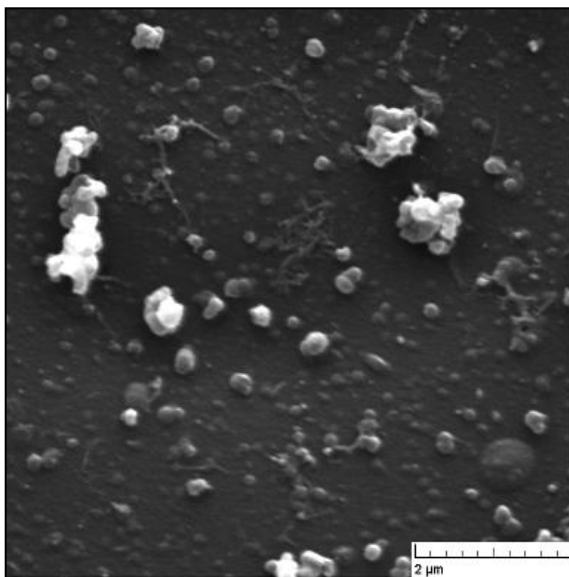


Obrázek 31. Závíslost S (senzitivita) na čase pro CNT a PANI vložených do organické páry etanolu.

Na Obrázku 31., kde je zobrazena závislost senzitivity na čase pro materiál CNT a PANI ve formě granulí, je vidět, že použitý senzor z výše jmenovaných materiálů je vratný a může se použít opakovaně.

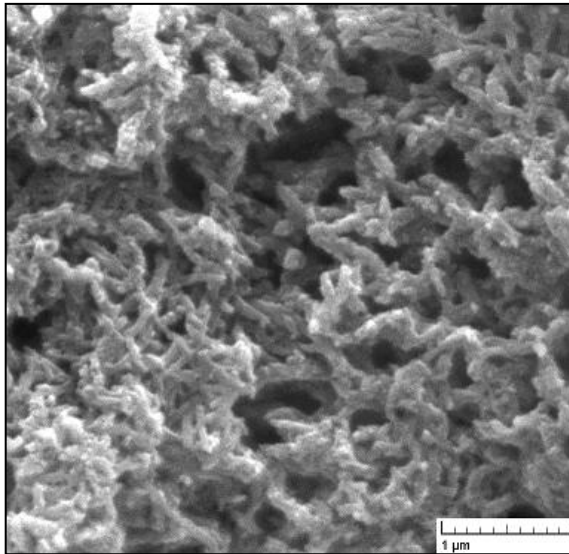
7.7 SEM mikroskopie

Pomocí SEM mikroskopu byla sledována struktura PANI ve formě granulí, PANI ve formě nanovláken a CNT sítě. Vzorek PANI ve formě nanovláken byl připraven odfiltrováním vzniklého roztoku připraveného při syntéze PANI ve formě nanovláken, viz 6.1.2. Při filtraci byl vzorek promytý vodou a usušen. Následně byl vložen do metanolu a za varu se udělal reflex. Metanol se oddělil a vzorek se opět nechal vysušit.



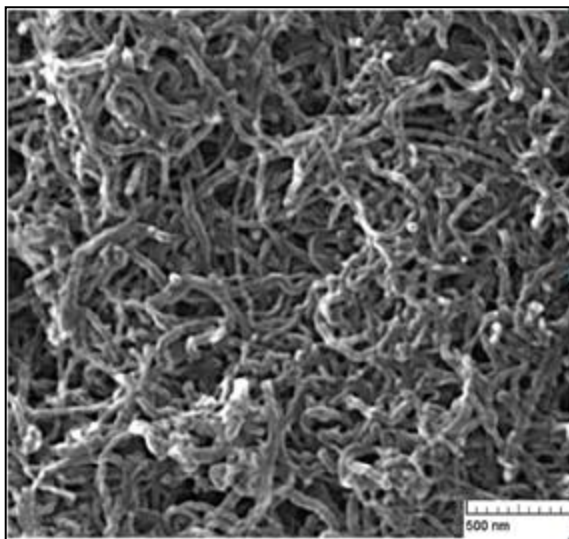
Obrázek 32. SEM snímek PANI ve formě granulí.

Na Obrázku 32. je vyobrazena struktura PANI, která je vytvořená na PET fólii znázorňující tmavé části snímku. Světlé části snímku znázorňuje PANI vykazující globulární morfologii. Velikost granulí PANI je přibližně 150 nm. Velikost těchto granulí je způsobeno rychlosti míchání a také koncentrací při syntéze PANI na PET fólii.



Obrázek 33. SEM snímek PANI ve formě nanovláken.

Obrázek 33. ukazuje SEM analýzu PANI ve formě nanovláken, kde je vidět hustá síť těchto nanovláken o tloušťce okolo 200 nm a jejich struktura je nahodile orientovaná.



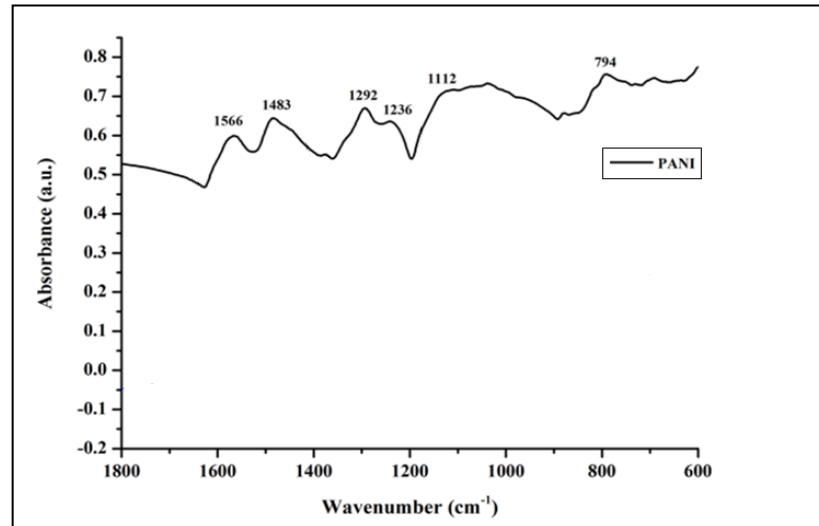
Obrázek 34. SEM snímek zapletené CNT sítě.

Na Obrázku 34. je vidět síť CNT filtrované na membráně z PU nanovláken. Vrstvy těchto sítí jsou do sebe náhodně zapletené.

7.8 Infračervená spektroskopie

Infračervené spektrum čistého PANI je zobrazeno na Obrázku 35. Pík 1566 cm^{-1} vznikl výskytem chinoidním kruhem, zatímco pík 1483 cm^{-1} byl výsledkem vibrací benzenového

kruhu. Pík 1292 cm^{-1} byl způsoben vibracemi vazby C–N a pík 794 cm^{-1} vznikl kvůli mimorovinným deformačním vibracím N–H vazby. Píky 1112 cm^{-1} a 1236 cm^{-1} byly dosaženy prodlužováním a otáčením C–C vazby alkylové skupiny.



Obrázek 35. Infračervené spektrum čistého PANI.

8 POUŽITÉ PŘÍSTROJE A CHEMIKÁLIE

8.1 Přístroje

Pro měření elektrického odporu byl použit digitální multimetr a pro aplikaci analytických metod bylo využito SEM mikroskopu a infračervené spektroskopie.

Digitální multimetr UNI-T UT71C

Použití pro měření elektrického odporu pomocí dvoubodové metody. Využití při měření vlhkosti i pro odezvy organických par.



Obrázek 36. Digitální multimetr RC UNI-T UT71C

SEM mikroskop

SEM mikroskop je určen k pozorování povrchů vzorku při velkém zvětšení, patří mezi nepřímé analytické metody.



Obrázek 37. Snímek SEM mikroskopu.

Infračervená spektroskopie

Infračervená spektroskopie slouží k identifikaci a strukturní charakterizaci organických sloučenin.

8.2 Chemikálie

V praktické části bakalářské práce byly za pomoci různých chemikálií připraveny PANI a CNT. Kromě zmíněných chemikálií, které jsou uvedeny níže, byla v obou případech použita rovněž destilovaná voda. V praktické části bylo dále využito několik druhů rozpouštědel.

Syntéza PANI

Základní vlastnosti chemikálií použitých při syntéze PANI jsou zobrazeny v Tabulce 5. Tato tabulka obsahuje název jednotlivých chemikálií a dále pak jejich sumární vzorec, molární váhu a hustotu při 20 °C.

Tabulka 6. Syntéza PANI - vybrané vlastnosti použitých chemikálií.

Chemikálie	Sumární vzorec	Molární váha [g/mol]	Hustota při 20 °C [g/cm ³]
Anilin	C ₆ H ₇ N	93,13	1,02
Anilin hydrochlorid	C ₆ H ₈ ClN	129,59	1,22
Peroxodisíran amonný (APS)	H ₈ N ₂ O ₈ S ₂	228,18	1,98
Hehahydrát chloridu železitého	Cl ₃ Fe.6H ₂ O	270,33	1,82
Kyselina chlorovodíková	HCl	36,46	1,19

Syntéza sítě CNT

Přehled chemikálií pro přípravu CNT sítě se nachází v Tabulce 7. a přehled základních charakteristik MWCNT použitých při této přípravě CNT je uvedeno v Tabulce 8.

Tabulka 7. Syntéza sítě CNT - vybrané vlastnosti použitých chemikálií.

Chemikálie	Sumární vzorec	Molární váha [g/mol]	Hustota při 20 °C [g/cm ³]
Dodecyl sulfát sodný (SDS)	C ₁₂ H ₂₅ NaO ₄ S	288,38	1,10
Hydroxid sodný	NaOH	40,00	2,39
Pentanol	C ₅ H ₁₂ O	88,15	0,81

Tabulka 8. Syntéza sítě CNT – charakteristika použitých MWCNT.

Druh CNT	Průměr [nm]	Délka [μm]	Čistota [%]
Vícestěnné uhlíkové nanotrubičky (MWCNT)	10 - 30	1 - 10	>90

Organická rozpouštědla

Přehled sloučenin, které byly použity pro měření a snímání organických par senzorem, jsou uvedeny v Tabulce 9.

Tabulka 9. Vybrané vlastnosti organických par

Druh organické páry	Sumární vzorec	Molární váha [g/mol]	Hustota [g/cm ³]
N,N-dimethylacetamid (DMAC)	C ₄ H ₉ NO	87,12	0,94
N,N-dimethylformamid (DMF)	C ₃ H ₇ NO	73,09	0,944
Dimethylsulfoxid (DMSO)	C ₂ H ₆ OS	78,13	1,10
Heptan	C ₇ H ₁₆	100,21	0,684
Etanol	C ₂ H ₆ O	46,07	0,789

ZÁVĚR

V teoretické části byla obecně popsána základní charakteristika PANI, dále některé metody použité v praktické části a v neposlední řadě problematika principu senzorů a jejich možné využití v praxi. Cílem předložené experimentální části bylo připravit tenký PANI film vhodný jako snímací materiál senzoru pro měření vlhkosti a organických par. Tenký PANI film ve formě granulí byl připraven během polymerace na PET fólii.

Takto připravený vzorek byl umístěn mezi dvě elektrody. Následně bylo provedeno měření vlhkosti, při kterém docházelo ke snižování elektrického odporu, což zapříčinilo zvýšení elektrické vodivosti. Senzitivita se po vložení vzorku do vlhkosti postupně zvyšovala. Výsledným efektem při měření PANI ve formě granulí bylo, že opakovaně docházelo k adsorpci a desorpci molekul vody, což je vhodné pro aplikaci senzorů. Následně byl připraven PANI ve formě nanovláken. Během měření vlhkosti vykazoval vzorek podobné vlastnosti jako PANI ve formě granulí, avšak po vyjmutí vzorku z prostředí s řízenou vlhkostí nedocházelo k navrácení na původní hodnotu senzitivity, jelikož poskytnutý časový interval nebyl dostatečně dlouhý a doba regenerace senzoru neprobíhala příliš rychle. Následné zlogaritmování výsledného elektrického odporu ukázalo, že více lineární je PANI ve formě nanovláken. Tento výsledek může ovlivnit aplikaci senzorů v praxi.

Při měření organických par bylo využito vzorku PANI ve formě granulí a vzorku sítí CNT. Tyto vzorky byly podstoupeny reakcím s párami pěti různých rozpouštědel, při nichž docházelo k růstu elektrického odporu (senzitivity). Nejdříve byly srovnány výsledky odezvy PANI a CNT na organické páry DMF, DMAC a DMSO. Z naměřených hodnot bylo zřejmé, že CNT na tyto páry reagují minimálně, přičemž nejvyšší citlivost byla zjištěna při vystavení senzoru parám DMF. Taktéž u vzorku PANI byla vyzorována největší změna senzitivity u tohoto rozpouštědla. Důvodem této změny může být dobrá interakce PANI s výše zmíněnými rozpouštědly. Následně byla měřena senzitivita PANI a CNT při použití organických par etanolu a heptanu. Zatímco PANI na páry etanolu reaguje dobře, což může být přičítáno polárnosti tohoto rozpouštědla, u organických par heptanu byla reakce PANI opačná, jelikož se heptan řadí mezi nepolární rozpouštědla. Oba dva materiály byly současně vystavovány parám pěti různých rozpouštědel, a tímto byla zajištěna jejich selektivita. Výhodou využití těchto materiálů, jako senzorů pro detekci organických par, je jejich dlouhodobá stabilita zaručující opakovatelnost měření.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PROKOPOVÁ, Irena. *Makromolekulární chemie*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2004, 207 s. ISBN 80-7080-554-4.
- [2] STEJSKAL, Jaroslav. Polyanilin: vodivý polymer. *Otevřená věda* [online]. [cit. 2014-04-08] Dostupné z: <<http://archiv.otevrena-veda.cz/users/Image/default/C1Kurzy/NH2006pdf/16.pdf>>
- [3] KUMAR, D., SHARMA, C. Advances in conductive polymers. *European Polymer Journal*. 1998, roč. 34, č. 8, s. 1053-1060.
- [4] YONGFANG, L., YONG, C., GAO, J., et al. Electrochemical properties of luminescent polymers and polymer light-emitting electrochemical cells. *Synthetic Metals*. 1999, roč. 99, č. 3, s. 243-248.
- [5] MACDIARMID, G., et al. 1982, US Patent, Patent No. 4 321 114.
- [6] DRÁPALA, J., KURSA, M. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2012, 439 s. ISBN 978-80-248-2570-0.
- [7] YUE, J., WANG, Z.H., CROMACK, K.R., EPSTEIN, A.J. a A.G., MACDIARMID. Effect of sulfonic-acid group on polyaniline backbone. *Journal of the American Chemical Society*. 113(7). Washington, DC: American Chemical Society, 1991, s. 2665-2671. ISSN 0002-7863.
- [8] KAPIL, A., TAUNK, K. and S. CHAND. Preparation and charge transport studies of chemically synthesized polyaniline. *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*. 21(4). Dordrecht: Springer, 2010, s. 399-404. ISSN 0957-4522.
- [9] PROKEŠ, J., STEJSKAL, J., OMASTOVÁ, J. Polyanilin a polypyrrol - dva představitelé vodivých polymerů. *Chemické listy* [online]. 2001, č. 95, s. 380-383 [cit. 2014-04-20]. ISSN 1213-7103. Dostupné z: <<http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/archiv/2001/08-PDF/484-492.pdf>>
- [10] BHADRA, Sambhu et al. Progress in preparation, processing and applications of polyaniline. *Progress in Polymer Science* [online]. 2009, roč. 34, č. 8, s. 783-810 [cit. 2014-05-01]. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2009.04.003.

- [11] JÄGER, A., GÄRTNEROVÁ, V. *Elektronový mikroskopem do nitra materiálů aneb jak vypadá jejich struktura* [online]. 2008 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <<http://www.fzu.cz/popularizace/elektronovym-mikroskopem-do-nitra-materialu-aneb-jak-vypada-jejich-struktura>>
- [12] BÍLÝ, Tomáš. *Fyzikální principy transmisní a skenovací elektronové mikroskopie*. České Budějovice, 2007. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Pedagogická fakulta, Katedra Fyziky.
- [13] *Scanning Electron Microscopy (SEM)*. In: [online]. [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <<http://www.microscopy.ethz.ch/sem.htm>>
- [14] KARLÍK, Miroslav. Transmisní elektronová mikroskopie: pohled do nitra materiálů. *Československý časopis pro fyziku*. 2005, roč. 55, č. 5, s. 457-464. ISSN 1804-8536.
- [15] *Transmisní elektronový mikroskop*. In: [online]. [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <<http://www.paru.cas.cz/lem/book/Podkap/3.0.html>>
- [16] KANIA, Patrik. *Infračervená spektrometrie*. In: [online]. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/anl/lach1/7_IC.pdf>
- [17] *Infračervená spektroskopie*. In: [online]. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <<http://lms.vscht.cz/Zverze/Infrared.htm>>
- [18] *Infračervená spektroskopie*. In: [online]. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://fch.upol.cz/skripta/zfcm/ir/ir_teorie.htm>
- [19] *Ongoing Project 5 - Infrared Spectroscopy for the Characterization of Surfaces*. In: [online]. [cit. 2014-05-06]. Dostupné z: <<http://research.chem.ucr.edu/groups/zaera/ongoingproject5.html>>
- [20] NĚMEC, Dobroslav. *Fyzikální základy technologií*. 1. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011, 166 s. ISBN 978-80-7318-998-3.
- [21] *Měření elektrického odporu*. In: [online]. [cit. 2014-05-06]. Dostupné z: <http://elm-fur.wz.cz/mereni_odporu.ppt>
- [22] OSTŘÍŽEK, Petr. *Elektrotransportní vlastnosti nanostruktur připravených metodou FIB*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav fyzikálního inženýrství.
- [23] IIJIMA, S. Helical microtubules of graphitic carbon, *Nature*. 354 (1991) 56–58.

- [24] DAZA, R. Los nanotubos de carbono y la ingeniería de tejidos (I). In: [online]. [cit. 2014-05-07]. Dostupný z: <http://www.madrimasd.org/blogs/ingenieria_materiales/2012/03/25/347/>
- [25] MALOŇOVÁ, Kristýna. *Elektrická vodivost uhlíkových nanokompozitů*. Zlín, 2008. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Technologická fakulta, Chemie a technologie materiálů.
- [26] LHOTÁK, Pavel. *Chemie fullerenů*. Ústav Organické Chemie, VŠCHT Praha. In: [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupný z: <http://www.w.uochb.cas.cz/Zpravy/PostGrad2004/7_Lhotak.pdf>
- [27] AJAYAN, P. M. Nanotubes from Carbon. *Chemical Reviews*. 1999, roč. 99, č. 7, s. 1787–1800.
- [28] DAENEN, M., FOUW, R. D., HAMERS, B., et al. The Wondrous World of Carbon Nanotubes. A review of current carbon nanotube technologies. *Technical Report*. Eindhoven University of Technology, 2003, 89 s.
- [29] ANDO, Y., et al. Growing Carbon Nanotubes. *Review Feature. Materials today*. 2004, č. 22, s. 22 – 29.
- [30] SNÁŠELOVÁ, Helena. *Nanokompozit na bázi PVAc/MWNT připravený metodou roztokové polymerace, příprava nanovláken technologií elektrospinning*. Zlín, 2008. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Technologická fakulta, Chemie a technologie materiálů.
- [31] HRUŠKA, František. *Senzory. Fyzikální principy, úpravy signálů, praktické použití*. 2. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 202 s. ISBN 978-80-7454-096-7.
- [32] BAREK, Jiří. *Senzory*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 2007, 233 s. ISBN 978-80-86238-20-3.
- [33] *Rozdělení senzorů*. In: [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: <http://www.eamos.cz/amos/kat_fyz/externi/kat_fyz_6544/html/cidla/rozdeleni/rozdeleni.htm>
- [34] CHEN, Z., LU, C. Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms. *Sensor Letters* [online]. 2005, roč. 3, č. 4, s. 274-295 [cit. 2014-05-09]. Dostupné z: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.146.3346&rep=rep1&type=pdf>>

- [35] ZENG, F., et al. Humidity sensors based on polyaniline nanofibres. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2010, roč. 143, č. 2, s. 530-534. ISSN 0925-4005
- [36] SMOLKA, Václav. *Vlhkost vzduchu a její charakteristiky*. In: [online]. [cit. 2014-05-09]. Dostupné z: <<http://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/vlhkost-vzduchu/>>
- [37] A Comparison of Relative Humidity Sensing Technologies. *Applications Note 2004-2*. Hygrometrix Inc: Alpine, CA, USA, s. 1–5 [online]. [cit. 2014-05-09]. Dostupné z: <<http://www.scribd.com/doc/190410905/A-Comparison-of-Relative-HUMIDITY>>
- [38] CROWLEY, K., SMYTH, M., KILLARD, A., MORRIN, A. Printing polyaniline for sensor applications. *Chemical Papers*. 2013, roč. 67, č. 8, s. 771-780.
- [39] KROUPA, Michael. *Organické materiály – Senzory par a plynů*. Plzeň, 2014. Autoreferát disertační práce k získání akademického titulu „Doktor“. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra technologií a měření.
- [40] *Tenze par kapalin*. In: [online]. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/fch/cz/pomucky/Skripta_kap_07.pdf>
- [41] HORÁK, J., LINHART, I., KLUSOŇ, P. *Úvod do toxikologie a ekologie pro chemiky*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 2004, 189s. ISBN 80-7080-548-X.
- [42] PALEČEK, J., LINHART, I., HORÁK, J. *Toxikologie a bezpečnost práce v chemii*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 1999, 189s. ISBN 80-7080-266-9.
- [43] SMALLWOOD, I. *Handbook of Organic Solvent Properties*. 1. vyd. New York: Halsted Press, 1996, 320 s. ISBN 0-340-64578-4.
- [44] BAI, H., SHI, G. Gas Sensors Based on Conductiong Polymers. *Sensors* [online]. 2007, č. 7, s. 267-307 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/7/3/267/pdf>>
- [45] WANG, Y., YEOW, J. A Review of Carbon Nanotubes-Based Gas Sensors. *Journal of Sensors* [online]. 2009, 24 s. [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <<http://www.hindawi.com/journals/js/2009/493904/>>
- [46] BLAIR, R. et al. Construction of a Polyaniline Nanofiber Gas Sensors. *Journal of Chemical Education*. 2008, roč. 85, č. 8, s. 1102-1104. DOI: 10.1021/ed085p1102.
- [47] MOHAMMAD, F. *Specialty Polymers: Materials and Applications*. 1. vyd. New Delhi: I. K. International Pvt Ltd, 2007, 588 s. ISBN: 81-88237-65-5.

- [48] WANG, H., LI, Y., YANG, M. Sensors for organic vapor detection based on composites of carbon nanotubes functionalized with polymers. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2007, roč. 124, č. 2, s. 360-367. ISSN 0925-4005.
- [49] KOROTCENKOV, G. *Handbook of Gas Sensor Materials*. 1. vyd. New York: Springer, 2013, 442 s. ISBN 978-1-4614-7387-9.
- [50] FORNEY, Ch. F., BRANDL, D. G. Control of Humidity in Small Controlled environment Chambers using Glycerol-Water Solutions. *Hort Technology*. 1992, s. 52 – 54.
- [51] OLEJNIK, R., SLOBODIAN P., RIHA P., MACHOVSKY, M. Increased sensitivity of multiwalled carbon nanotube network by PMMA functionalization to vapors with affine polarity. *Journal of Applied Polymer Science*. 2012, roč. 126, č. 1, s. 21-29. DOI: 10.1002/app.36366. Dostupné z: <<http://doi.wiley.com/10.1002/app.36366>>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

IR	Infračervená spektroskopie
CNT	Uhlíkové nanotrubičky
SWCNT	Jednotěnné uhlíkové nanotrubičky
MWCNT	Vícetěnné uhlíkové nanotrubičky
DWCNT	Dvoutěnné uhlíkové nanotrubičky
PANI	Polyanilin
NaOH	Hydroxid sodný
SDS	Dodecyl sulfát sodný
PET	Polyethylentereftalát
FeCl ₃ .6H ₂ O	Hexahydrát chloridu železitého
HCl	Kyselina chlorovodíková
APS	Peroxodisíran amonný
DMF	Dimethylformamid
DMSO	Dimethylsulfoxid
DMAC	Dimethylacetamid
U	Napětí
I	Proud
R	Elektrický odpor
SEM	Skenovací elektronová mikroskopie
TEM	Transmisní elektronová mikroskopie
KBr	Bromid draselný
RH	Relativní vlhkost

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Obecný vzorec polymeru [1].	12
Obrázek 2. Nejdůležitější vodivé polymery [2].	12
Obrázek 3. Formy polyanilinu [2].	16
Obrázek 4. Oxidace anilinu peroxydisíranem amonným poskytuje PANI [2].	17
Obrázek 5. Ukázka velikosti objektů pozorovatelných elektronovým mikroskopem [11].	18
Obrázek 6. Popis a porovnání konstrukce transmisního elektronového mikroskopu a skenovacího elektronového mikroskopu [14].	19
Obrázek 7. Princip Infračervené spektroskopie [19].	20
Obrázek 8. Schéma dvoubodové metody [22].	22
Obrázek 9. Schéma čtyřbodová metody [22].	22
Obrázek 10. A) Jednostěnná uhlíková nanotrubička, B) Vícestěnná uhlíková nanotrubička [24].	23
Obrázek 11. Schéma aparatury obloukového výboje pro přípravu CNT [29].	25
Obrázek 12. Schéma aparatury laserové ablace pro přípravu CNT [29].	25
Obrázek 13. Schéma aparatury chemické depozice z par pro přípravu CNT [30].	26
Obrázek 14. Schéma měřicího řetězce [31].	28
Obrázek 15. Základní formy struktury PANI po polymeraci [34].	33
Obrázek 16. Průběh polymerace PANI ve formě granulí.	39
Obrázek 17. Průběh polymerace PANI ve formě nanovláken.	40
Obrázek 18. Schéma napnutí PU membrány na nadstavec.	40
Obrázek 19. Vztah měrné hmotnosti (SG) a obsah glycerolu v roztoku glycerol-voda.	41
Obrázek 20. Závislost S (senzitivita) na čase pro materiál PANI ve formě granulí při měření vlhkosti.	43
Obrázek 21. Závislost elektrického odporu na relativní vlhkosti.	44
Obrázek 22. Závislost zlogaritmovaného elektrického odporu na relativní vlhkosti.	44
Obrázek 23. Závislost S (senzitivita) na čase pro materiál PANI ve formě nanovláken při měření vlhkosti.	45
Obrázek 24. Závislost elektrického odporu na relativní vlhkosti.	46
Obrázek 25. Závislost zlogaritmovaného elektrického odporu na relativní vlhkosti.	46
Obrázek 26. Závislost S (senzitivita) na čase pro CNT a PANI vložených	48

Obrázek 27. Závislost S (senzitivita) na čase pro CNT a PANI vložených do organické páry DMAC.	48
Obrázek 28. Závislost S (senzitivita) na čase pro CNT a PANI vložených do organické páry DMSO.....	49
Obrázek 29. Závislost S (senzitivita) na čase pro CNT a PANI vložených do organické páry etanolu.	50
Obrázek 30. Závislost S (senzitivita) na čase pro CNT a PANI vložených do organické páry heptanu.	50
Obrázek 31. Závislost S (senzitivita) na čase pro CNT a PANI vložených do organické páry etanolu.	51
Obrázek 32. SEM snímek PANI ve formě granulí.	52
Obrázek 33. SEM snímek PANI ve formě	53
Obrázek 34. SEM snímek zapletené CNT sítě.	53
Obrázek 35. Infračervené spektrum čistého PANI.	54
Obrázek 36. Digitální multimetr RC UNI-T UT71C.....	55
Obrázek 37. Snímek SEM mikroskopu.	56

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Srovnání konduktivity vodičů, polovodičů a izolantů [6].	14
Tabulka 2. Porovnání elektrické vodivosti, teplotní stability a zpracovatelnosti u vybraných vodivých polymerů [10].	16
Tabulka 3. Možnosti uplatnění senzorů pro měření vlhkosti [34, 35].	30
Tabulka 4. Senzitivita jednotlivých materiálů.	49
Tabulka 5. Senzitivita jednotlivých materiálů.	51
Tabulka 6. Syntéza PANI - vybrané vlastnosti použitých chemikálií.	57
Tabulka 7. Syntéza sítě CNT - vybrané vlastnosti použitých chemikálií.	57
Tabulka 8. Syntéza sítě CNT – charakteristika použitých MWCNT.	57
Tabulka 9. Vybrané vlastnosti organických par	58