

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektroenergetiky a ekologie**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Senzory relativní vlhkosti**

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Šárka MORÁVKOVÁ**  
Osobní číslo: **E16B0124P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Technická ekologie**  
Název tématu: **Senzory relativní vlhkosti**  
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Seznamte se s principy detekce relativní vzdušné vlhkosti a následně proveďte rešerši současných a moderních trendů v oblasti senzoričky vlhkosti.

1. Zpracujte přehled současných trendů senzoričky relativní vlhkosti v oblasti tištěné a flexibilní elektroniky.
2. Zpracujte přehled využití organické chemie v oblasti senzoričky relativní vlhkosti.
3. Zhodnoťte využitelnost nových trendů v běžné praxi.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

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

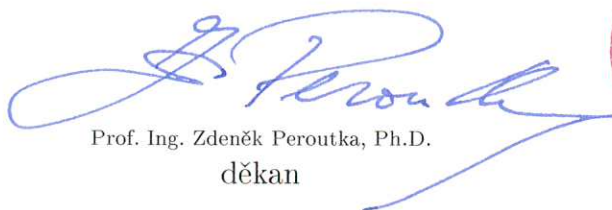
Seznam odborné literatury:

1. **WEBSTER, John G. The measurement, instrumentation, and sensors handbook. CRC Press, 1999. ISBN 978-0849383472.**
2. **Internetové zdroje**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Karel Šíma**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **5. října 2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13. června 2019**

  
Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na senzory relativní vlhkosti. Jsou zde uvedeny základní vzorce a definice, které charakterizují danou problematiku. Dále jsou podrobně popsány jednotlivé metody, využívající se v běžné praxi pro měření relativní vlhkosti, a také uvedeny přístroje, které se aplikují při laboratorním měření. Práce též pojednává o nejmodernějších typech senzorů vlhkosti, konkrétně na bázi optických vláken, organických materiálů a v neposlední řadě o tištěných senzorech vlhkosti. Na úplném závěru práce se nachází zhodnocení využitelnosti trendů měření relativní vlhkosti v běžné praxi.

## **Klíčová slova**

Relativní vlhkost, senzor vlhkosti, psychrometr, Testo, optické vlákno, Fabry-Perotův interferometr, organické materiály, tištěné senzory.

**Abstract**

This bachelor thesis is focused on sensors of relative humidity. There are basic formulas and definitions that characterize the issue. Furthermore, the individual methods that are commonly used for measuring relative humidity are described in detail, as well as the instruments that are applied in laboratory measurements. The thesis also deals with the most modern types of humidity sensors, namely sensors based on optical fibers, organic materials and last but not least printed humidity sensors. At the end of the thesis there is an evaluation of the usability of relative humidity measurement trends in common practice.

**Key words**

Relative humidity, humidity sensor, psychrometer, Testo, optical fiber, Fabry-Perot interferometer, organic materials, printed sensors.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 7.6.2019

Šárka Morávková

## **Poděkování**

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu bakalářské práce Ing. Karlu Šimovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

## Obsah

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>1 TEORETICKÝ ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
1.1 VLHKOST VZDUCHU .....	11
1.2 ABSOLUTNÍ VLHKOST VZDUCHU .....	11
1.3 RELATIVNÍ VLHKOST VZDUCHU .....	11
1.4 ROSNÝ BOD .....	11
1.5 MOLLIERŮV DIAGRAM.....	12
1.6 KONDENZACE .....	13
1.7 VYPAŘOVÁNÍ.....	13
1.8 SORPCE A DESORPCE .....	13
1.8.1 <i>Absorpce</i> .....	13
<b>2 PRINCIPY MĚŘENÍ RELATIVNÍ VLHKOSTI</b> .....	<b>14</b>
2.1 ÚVOD .....	14
2.2 VÁHOVÁ METODA .....	14
2.3 PSYCHROMETRICKÁ METODA .....	15
2.4 METODA ROSNÉHO BODU .....	16
2.5 HYGROMETRICKÁ METODA .....	17
2.5.1 <i>Dilatační hygrometry</i> .....	17
2.5.2 <i>Elektrolytický hygrometr</i> .....	18
2.5.3 <i>Odporové vlhkoměry</i> .....	19
2.5.4 <i>Kapacitní vlhkoměry</i> .....	20
<b>3 PŘÍSTROJE TESTO</b> .....	<b>21</b>
3.1 VLHKOSTNÍ A TEPLTNÍ SONDA.....	21
3.2 TERMOHYGROMETR .....	22
3.3 VLHKOMĚRY .....	22
<b>4 SENZOR VLHKOSTI NA BÁZI OPTICKÝCH VLÁKEN</b> .....	<b>23</b>
4.1 FABRY-PEROTŮV INTERFEROMETR .....	24
4.1.1 <i>Charles Fabry a Alfred Perot</i> .....	24



4.1.2	<i>Interference světla</i> .....	25
4.1.3	<i>Historie Fabry-Perotova interferometru</i> .....	25
4.1.4	<i>Vývoj Fabry-Perotova interferometru</i> .....	26
4.1.5	<i>Fabry-Perotův interferometr v dnešní době</i> .....	26
4.2	FABRY-PEROTŮV SENZOR VLHKOSTI NA BÁZI CHITOSANU .....	27
4.2.1	<i>Chitosan</i> .....	27
4.2.2	<i>Fabry-Perotův interferometr na bázi chitosanu</i> .....	27
4.2.3	<i>Výroba senzoru</i> .....	28
4.2.4	<i>Experiment</i> .....	29
<b>5</b>	<b>ORGANICKÉ SENZORY VLHKOSTI</b> .....	<b>31</b>
5.1	ÚVOD .....	31
5.2	SENZOR VLHKOSTI NA BÁZI GRAFENU .....	32
5.3	KAPACITNÍ SENZOR VLHKOSTI ZALOŽENÝ NA KAPILÁRNÍM KONDENZAČNÍM EFEKTU VÍCEVRSTVÝCH UHLÍKOVÝCH NANOTRUBIC .....	33
5.4	SENZOR VLHKOSTI NA BÁZI FTALOCYANINCHLORIDU HLINITÉHO .....	34
5.5	SENZOR VLHKOSTI NA BÁZI MIKROVLNNÉHO REZONÁTORU A PEDOT:PSS.....	35
5.6	FLEXIBILNÍ VLHKOSTNÍ SENZOR NA BÁZI NANOKOMPOZITU CELULÓZY A POLYPYRROLU .....	36
5.7	SENZOR VLHKOSTI NA BÁZI KOMPOZITU OXID ZINEČNATÝ-OXID KŘEMIČITÝ .....	37
5.8	SENZOR VLHKOSTI NA BÁZI KOMPOZITU GRAFEN-OXID TITANIČITÝ .....	38
<b>6</b>	<b>TIŠTĚNÉ SENZORY VLHKOSTI</b> .....	<b>39</b>
6.1	ÚVOD .....	39
6.2	TIŠTĚNÝ KAPACITNÍ SENZOR VLHKOSTI – PHEMA .....	39
6.3	TIŠTĚNÝ SENZOR VLHKOSTI NA BÁZI UHF RFID SYSTÉMU .....	40
6.4	TIŠTĚNÝ RFID SENZOR NA BÁZI POLYELEKTROLYTU .....	42
6.5	TIŠTĚNÝ SENZOR VLHKOSTI NA PLASTOVÉM SUBSTRÁTU .....	44
6.6	SENZOR NA BÁZI TETRAFLUORETHYLENU TIŠTĚNÝ NA TEXTILII .....	46
<b>7</b>	<b>VYUŽITELNOST TRENDŮ V BĚŽNÉ PRAXI</b> .....	<b>47</b>
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>49</b>
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....	50
	PŘÍLOHY .....	54

## Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na senzory relativní vlhkosti a principy metod, které se běžně používají pro snímání a měření vlhkosti.

Práce je rozdělena do pěti hlavních částí; první se věnuje teoretickému úvodu, ve druhé části jsou představeny nejpoužívanější metody měření relativní vlhkosti v dnešní době. Ve třetí části jsou uvedeny přístroje, které se obvykle používají např. při laboratorních měřeních relativní vlhkosti. Čtvrtá část pojednává o nejnovějších trendech v oblasti technologie výroby senzorů relativní vlhkosti. Konkrétně jsem v práci popsala optický senzor vlhkosti na bázi chitosanu, využívající Fabry-Perotův interferometr, dále organické senzory vlhkosti a tištěné senzory vlhkosti. V poslední části se věnuji využití nejnovějších trendů měření relativní vlhkosti v běžné praxi, které závisí zejména na vlastnostech použitého materiálu a účinnosti dané metody. Nejdůležitějšími parametry pro správné měření relativní vlhkosti jsou: citlivost senzoru, přesnost senzoru, doba odezvy a zotavení, opakovatelnost a provoz v širokém rozsahu relativní vlhkosti.

## Seznam symbolů a zkratek

AJP .....	Aerosol Jet Printing
CAB .....	acetát-butyrát celulóza
LED .....	elektroluminiscenční dioda
AlPcCl .....	ftalocyaninchlorid hlinitý
LiCl .....	chlorid lithný
RFID.....	identifikace na rádiové frekvenci
SnO <sub>2</sub> .....	oxid cíničitý
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	oxid hlinitý
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	oxid inditý
SiO <sub>2</sub> .....	oxid křemičitý
TiO <sub>2</sub> .....	oxid titaničitý
ZnO .....	oxid zinečnatý
WO <sub>3</sub> .....	oxid wolframový
pHEMA .....	poly(2-hydroxyethyl methakrylát)
PEDOT:PSS .....	poly(3,4-ethylendioxythiofen) polystyren sulfonát
PET .....	polyethylentereftalát
PPy .....	polypyrrol
RH.....	relativní vlhkost
UHF.....	ultra vysoké frekvence

# 1 Teoretický úvod

## 1.1 Vlhkost vzduchu

Vlhkost vzduchu je veličina, jež je definována jako množství vody (vyskytující se v plynném stavu, označována jako vodní pára), obsažené v daném množství vzduchu. Rozlišujeme dva typy vlhkosti vzduchu – relativní a absolutní vlhkost.

## 1.2 Absolutní vlhkost vzduchu

Absolutní vlhkost vzduchu  $\Phi$  můžeme popsat jako váhové množství vody, respektive vodní páry, které je obsažené v jednotce objemu vzorku – tzn. v 1 m<sup>3</sup> vzduchu [1]. Definujeme ji tedy jako:

$$\Phi = \frac{m}{V} [kg \cdot m^{-3}], \quad (1.2)$$

kde  $m$  je hmotnost vodní páry, vyjádřena v kg a  $V$  je objem vzduchu v m<sup>3</sup>.

## 1.3 Relativní vlhkost vzduchu

Relativní vlhkost vzduchu  $\varphi$  vyjadřuje poměr absolutní vlhkosti  $\Phi$  k maximální hodnotě absolutní vlhkosti  $\Phi'$ , kterou by vzduch měl ve stavu nasycení při stejné teplotě a tlaku. Kvůli poměrové závislosti je relativní vlhkost vzduchu někdy označována i jako poměrná vlhkost [1]. Lze ji vyjádřit jako

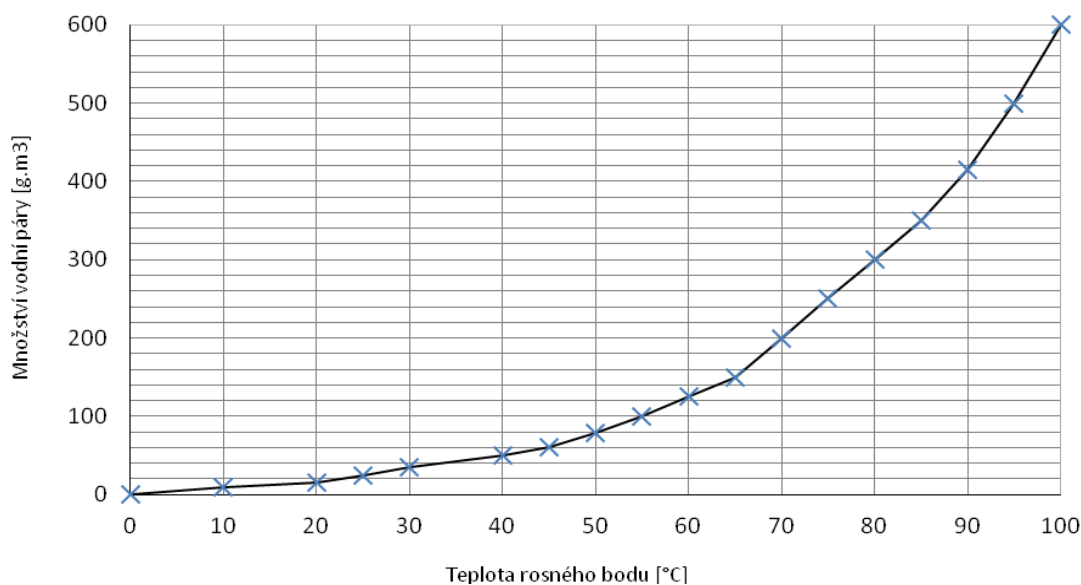
$$\varphi = \frac{\Phi}{\Phi'} \cdot 100 \text{ nebo } \varphi = \frac{m}{M} \cdot 100[\%], \quad (1.3)$$

kde  $m$  je hmotnost nenasycené vodní páry, udávána v kg a  $M$  označuje hmotnost vodní páry v nasyceném stavu téhož objemu vzduchu, taktéž v kg.

## 1.4 Rosný bod

Teplota rosného bodu je hodnota, na kterou se vlhký vzduch ochladí, aby se stal nasyceným [1]. Nastává tedy stav, kdy je vzduch maximálně nasycen vodními parami, a v tomto okamžiku bychom naměřili relativní vlhkost  $\varphi = 100 \%$ . Pokud by teplota dále klesala pod hodnotu rosného bodu, nastala by kondenzace, tedy skupenská přeměna, kdy se plyn mění na kapalinu. Důvodem je právě nasycený vzduch, který již nemůže přijmout další vodní páry.

Na obrázku 1 můžeme vidět závislost množství vodní páry ve vzduchu na teplotě. Platí totiž, že teplota rosného bodu je rozdílná pro různé hodnoty absolutní vlhkosti vzduchu. Výsledná závislost je exponenciální a lze říci, že s rostoucím množstvím vodní páry ve vzduchu roste teplota rosného bodu. To znamená, že pokud je ve vzduchu velké množství vodní páry, musí být teplota vzduchu taktéž vysoká, aby nedošlo ke kondenzaci páry. Naopak, ve chvíli, kdy je množství vodní páry ve vzduchu velmi nízké, i teplota vzduchu může být nízká, aniž by došlo ke kondenzaci [1].



Obrázek 1: Závislost množství vodní páry na teplotě

## 1.5 Mollierův diagram

Mollierův diagram popisuje vztah mezi termodynamickými stavovými parametry vzduchu, konkrétně mezi vlhkostí vzduchu a teploty [2]. Podle použitých os se diagram taktéž může označit jako i-x, h-s nebo h-x diagram. Nejčastějším typem je diagram h-x, kde na vodorovné ose je vynesena měrná vlhkost vzduchu x. Tato hodnota vyjadřuje poměr množství vody (resp. vodních par) v dané hmotnosti vzduchu. Na svislé ose poté najdeme tzv. „suchou“ teplotu vzduchu, tzn. teplotu okolního vzduchu. Dále jsou v grafu vyznačeny následující vlastnosti: hustota vzduchu či např. přímky s konstantní entalpií. V neposlední řadě najdeme v Mollierově diagramu i relativní vlhkost vzduchu. Příklad diagramu h-x je uveden v příloze A.

## 1.6 Kondenzace

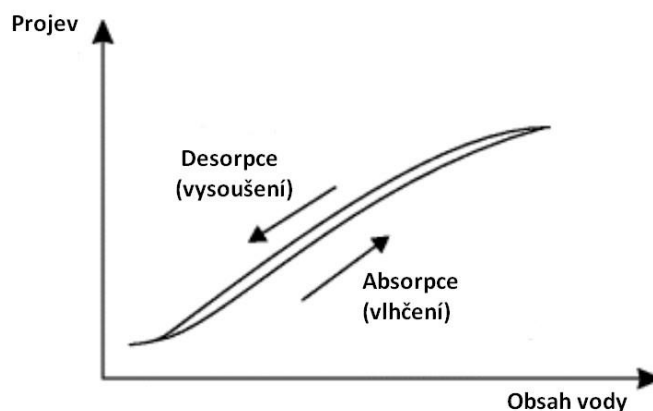
Kondenzace neboli kapalnění je označení pro změnu skupenství látky, konkrétně z plynné do kapalné fáze. Opačný proces se nazývá vypařování [2].

## 1.7 Vypařování

Vypařování je změna stavu hmoty, kdy se kapalina mění na plyn, avšak na rozdíl od varu se tento proces děje pouze na povrchu kapaliny, a ne v celém jejím objemu. Během vypařování se přenáší tepelná energie z okolního prostředí. Tento proces se často využívá při měření vlhkosti látky, zejména u psychrometrické metody [2].

## 1.8 Sorpce a desorpce

Sorpce a desorpce označují proces přijetí, resp. uvolnění vodní páry pevnou, kapalnou nebo plynnou látkou. Začlenění vody nebo vodní páry z okolního prostředí probíhá dějem nazývaným absorpce nebo chemickou vazbou. Proces desorpce je spojen se spotřebou energie z okolí, jejíž množství závisí na vazbách mezi molekulami vody a povrchem. Typické křivky sorpce a desorpce jsou znázorněny na obrázku 2, kde je patrné, že tyto křivky nejsou totožné. Každý materiál má své vlastní specifické sorpční charakteristiky, které závisí na tlaku a teplotě [2].



Obrázek 2: Proces absorpce vody a uvolňování pevnou látkou

### 1.8.1 Absorpce

Absorpce je děj, při kterém dochází k pohlcování částic (atomů, molekul) látky jinou látkou. Tento proces není omezen na povrch látek. Může se vyskytovat v plynech,

kapalinách i pevných látkách. Je důležité poznamenat, že absorbovaná látka je vázána chemickou reakcí a může dojít k chemickým změnám dané látky [2].

## 2 Principy měření relativní vlhkosti

### 2.1 Úvod

Vlhkost se dá měřit mnoha způsoby, přičemž mezi nejzákladnější patří metody váhové, psychrometrické, hygrometrické či metoda rosného bodu. Přístroje, které slouží k měření vlhkosti, se obecně nazývají vlhkoměry.

### 2.2 Váhová metoda

Princip váhového měření spočívá ve zvážení daného vzorku před a po vysušení. Prakticky se tato metoda může využít např. při zjišťování vlhkosti dřeva, přičemž se vyřízne určitá velikost vzorku dřeva, která se ihned po vyříznutí zváží. Poté se vzorek vloží do sušárny a vysuší do ustálené hmotnosti – pro přesné měření se nesmí rozdíly dvou po sobě naměřených hodnot po dvou hodinách lišit o více než 0,1 % [3]. Tento vysušený vzorek se opět ihned zváží a výslednou vlhkost  $\varphi$  poté vypočítáme dle vztahu

$$\varphi = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100 [\%], \quad (2.2)$$

kde  $m_1$  je hmotnost měřeného vzorku ve vlhkém (počátečním) stavu, vyjádřena v g a  $m_0$  popisuje hmotnost měřeného vzorku po vysušení, taktéž udávána v g.

Váhová měření patří k vůbec nejpřesnějším principům, avšak jedná se o laboratorní metodu, která není kontinuální. Přístroje, které se používají k měření váhovou metodou,



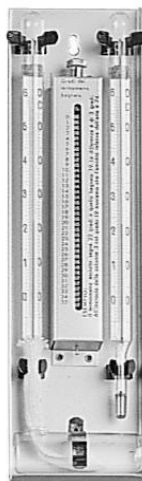
Obrázek 3: Sušící váha, typ Radwag MA 50.R [4]

jsou analytické váhy. Mezi různými druhy těchto vah můžeme najít i speciální váhy s ohřevem, tzv. sušící váhy (obrázek 3), které fungují jako váhy a zároveň i jako sušárna pro následné vysušení měřeného vzorku. Tyto váhy jsou schopné změřit nejen vlhkost pevných materiálů, ale i kapalných.

### 2.3 Psychrometrická metoda

Psychrometrická metoda využívá závislosti mezi částečným tlakem páry a rozdílem teploty mokrého a suchého teploměru. Právě rozdíl těchto dvou hodnot je nepřímo úměrný relativní vlhkosti. Psychrometr se tedy skládá ze dvou stejných teploměrů, z nichž jeden je mokrý a druhý suchý. Čidlo mokrého teploměru (rtuťová nádobka) je zabaleno do textilní punčošky, která je potopena do nádoby s destilovanou vodou. Textilie nasává vodu z nádoby a v závislosti na vlhkosti okolního prostředí se voda z textilie odpařuje. Suchý teploměr měří teplotu vzduchu v okolí [5].

Jedním z typů těchto měřicích přístrojů je Augustův psychrometr (obrázek 4), který měří relativní vlhkost pomocí psychrometrické diference – tedy rozdílu teplot na suchém a mokřém teploměru. K poklesu teploty na mokřém teploměru dochází v důsledku snižování relativní vlhkosti, která způsobí větší vypařování vlhkosti na mokřém teploměru. Pokud by byl systém obou teploměrů obklopen relativní vlhkostí 100 %, rozdíl teplot na teploměrech by byl nulový, jelikož už by nedocházelo k žádnému odpařování vodních par. Výslednou relativní vlhkost pak určíme z psychrometrických tabulek (viz příloha B) pomocí změřené teploty vzduchu na suchém teploměru a výslednému rozdílu teplot na suchém a mokřém teploměru.



Obrázek 4: Augustův psychrometr [6]



Dalším typem je Assmannův psychrometr (obrázek 5), který je konstruován stejným způsobem jako psychrometr Augustův, s jediným rozdílem, a tím je přidán ventilátor poháněný hodinovým strojkem. Vzduch z ventilátoru proudí kolem teploměrů rychlostí 2,5 m/s, což je rychlost, kdy se psychrometrický rozdíl teplot na suchém a mokřím teploměru téměř nemění. Platí totiž závislost mezi relativní vlhkostí a rychlostí proudění vzduchu.



Obrázek 5: Assmannův psychrometr [8]

Psychrometrická metoda je jednou z nejpoužívanějších a nejrozšířenějších metod pro určení relativní vlhkosti vzduchu. Hlavní výhodou psychrometrů je jejich nízká pořizovací cena a při teplotách nad 0 °C jsou dostatečně přesné. Naopak při nízkých teplotách narůstá chyba měření psychrometru, jelikož se neodpařuje tolik vlhkosti na mokřím teploměru a rozdíl teplot na obou teploměrech je nízký [7].

## 2.4 Metoda rosného bodu

Metoda rosného bodu využívá skutečnosti, že při ochlazení daného tělesa na teplotu rosného bodu, dochází při určité teplotě ke kondenzaci vodních par na povrchu předmětu. Přístroj je složen z kovového zrcátka, které odráží paprsek přicházející z LED diody pod určitým úhlem do snímače (většinou fotorezistoru). Ve chvíli, kdy dojde k ochlazení okolního vzduchu a zrcátko se orosí, světelný tok z LED diody zeslábně. Z aktuální teploty rosného bodu se poté určí relativní vlhkost. Připojený elektronický obvod obsahuje Peltierův článek, který funguje na principu Peltierova jevu. Ten je

v jistém smyslu opačný k Seebeckovu jevu, a dochází při něm ke skutečnosti, že jedna strana článku se zahřívá a druhá ochlazuje v důsledku napětí, které je přiváděno na termoelektrický článek.

Existuje i podobná metoda, avšak s takovým rozdílem, že místo kovového zrcátka je použito černé zrcátko, které opět odráží dopadající světelný paprsek z LED diody, avšak většinu tohoto světelného toku plocha zrcátka pohltí. Při ochlazení zrcátka a dosažení teploty rosného bodu, dojde k orosení povrchu zrcátka a výsledné množství odraženého světla se zvýší. Připojený elektronický obvod vyhodnotí stav a určí relativní vlhkost.

K určení relativní vlhkosti z teploty rosného bodu a teploty okolního vzduchu můžeme použít i Mollierův diagram, který je uveden v příloze A [9].

## 2.5 Hygrometrická metoda

Měření relativní vlhkosti pomocí hygrometrické metody můžeme rozdělit na dva způsoby: prvním z nich je způsob založený na schopnosti některých látek udržovat svoji vlhkost v rovnováze, tzn., že vlhkost látky je v rovnováze s vlhkostí okolního vzduchu. Přístroje, pracující na tomto principu, jsou dilatační vlhkoměry, resp. hygrometry (dochází ke změně rozměrů), odporová čidla (změna elektrické vodivosti), či kapacitní elektrická čidla (změna elektrické kapacity). Druhým způsobem je, že se pro dosažení rovnovážného stavu používá vnější ohřev hygroskopické látky. Přístroje pro tuto metodu jsou např. elektrolytické hygrometry LiCl.

### 2.5.1 Dilatační hygrometry

Základním principem těchto přístrojů je schopnost roztažnosti určitých látek vlivem vlhkosti. Hygrometry obsahují organický materiál, který se deformuje nebo mění svou délku. Ke změně vlastností určité látky dochází v důsledku schopnosti látky absorbovat vlhkost ze vzduchu.

Nejznámějším přístrojem, používajícím tuto metodu, je vlasový hygrometr (obrázek 6). Zařízení obsahuje odmaštěný lidský vlas, který je v přístroji natažený a připevněný k mechanismu, který je spojen s ručičkou na stupnici. V důsledku změny relativní vlhkosti

okolí dochází k dilataci (prodloužení) lidského vlasu. Míru prodloužení zaznamená ručička na stupnici. Měřicí rozsah vlasového hygrometru je 0 – 100 %, přičemž při změně relativní vlhkosti přes celý rozsah stupnice se lidský vlas prodlouží asi o 2,5 % své délky. Výhodou tohoto přístroje je možnost použití v poměrně velkém rozsahu teplot – od -25 až do +50 °C. Nevýhodou vlasového hygrometru je nutnost časté regenerace. Je velmi citlivý na otřesy a není možné pomocí tohoto přístroje měřit proudící plyny.

Kalibrace je prováděna způsobem, kdy se celý hygrometr zabalí do mokré tkaniny (pro dosažení 100% vlhkosti) a položí se do rovnovážné polohy. Po vybalení z tkaniny seřizovacím šroubkem nastavíme hodnotu na 100 % a počkáme, než se přístroj ustálí. Vlasový hygrometr patří v dnešní době k jednomu z nejméně přesných přístrojů pro měření relativní vlhkosti. I při správné manipulaci a častém regenerování je schopný dosáhnout pouhé přesnosti kolem  $\pm 3 \%$  [1, 9].



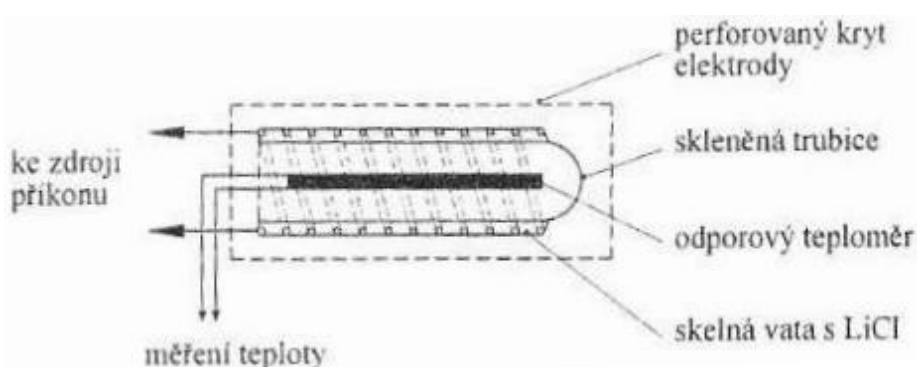
Obrázek 6: Vlasový hygrometr [6]

### 2.5.2 Elektrolytický hygrometr

Elektrolytické hygrometry patří do druhé skupiny hygrometrů, tzn., že pro dosažení rovnovážného stavu se používá vnější ohřev hygroskopické látky. Tyto látky se chovají tak, že při změně relativní vlhkosti pohlcují, nebo naopak vypařují vodní páru, která je v nich obsažená tím způsobem, aby byla obnovena rovnováha s vlhkostí okolního vzduchu. Metoda je založena na změně elektrické vodivosti  $G$ , resp. elektrického odporu  $R$ .

Přístroj, který využívá tohoto principu, je např. lithiumchloridový hygrometr s kapalným elektrolytem (obrázek 7). Aktivní část zařízení se skládá z velmi tenké

nevodivé trubičky, jež je potažena tkaninou, která obsahuje pár drátkových platinových elektrod a je napuštěna vodným roztokem chloridu lithného (LiCl). Uvnitř se nachází odporový teploměr, který slouží ke snímání teploty roztoku. Střídavý proud prochází elektrodami a v důsledku toho dochází k zahřívání elektrolytu a taktéž k částečnému odpařování vlhkosti. Při nárůstu vlhkosti vzduchu pohlcuje elektrolyt tuto vlhkost do sebe, což zapříčiní nárůst jeho vodivosti. Při zvýšené vodivosti roste i protékající proud a elektrolyt se zahřívá, až do té doby, než se vlhkost opět ustálí. Výsledná teplota elektrolytu je poté přímo úměrná relativní vlhkosti.



Obrázek 7: Elektrolytický hygrometr

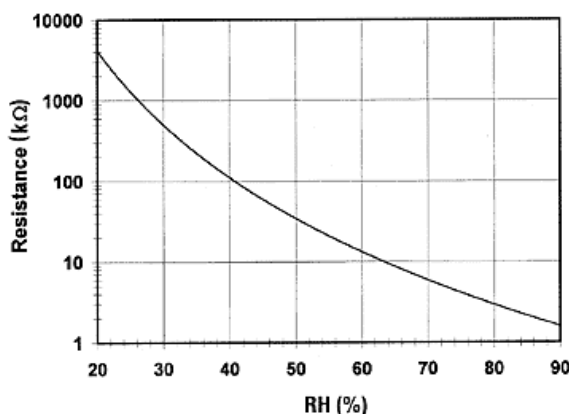
Na obdobném principu funguje i hygrometr s tuhým elektrolytem oxidu hlinitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Tento přístroj se skládá ze dvou elektrod, přičemž jedna je hliníková a pokrytá tenkou vrstvou  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , a druhá elektroda je z vodopropustné napařené tenké vrstvy zlata. Při pohlcování vlhkosti elektrolytem dochází ke změně elektrického odporu, z něhož se poté určuje relativní vlhkost [9].

### 2.5.3 Odporové vlhkoměry

Princip odporových vlhkoměrů závisí na změně elektrického odporu materiálu (elektrolytu), který pohlcuje vlhkost z okolního vzduchu. Velký počet materiálů mění svoji elektrickou vodivost na základě změny množství obsažené vody v nich. Mezi takovéto materiály, které mění elektrickou vodivost, resp. elektrický odpor v závislosti na relativní vlhkosti, patří především vodivé polymery a soli.

Senzor odporového vlhkoměru je tvořen nevodivou destičkou, většinou z keramiky, na níž je nanášena hygroskopická látka schopná vést elektrický proud. Destička má dvě ploché elektrody, přičemž jedna je vyrobená ze zlata a obsahuje póry pro lepší proniknutí

vzdušné vlhkosti, a druhá je z hliníku. Tyto elektrody jsou spojené s polymerem. Pro zabránění polarizace elektrod se při měření používá střídavý proud. Změna elektrické vodivosti (resp. odporu) se projeví tak, že polymer v závislosti na relativní vlhkosti plynné látky (vzduchu) pohlcuje vlhkost. Odporové vlhkoměry jsou schopny změřit relativní vlhkost v rozsahu 3 – 95 %, s přesností  $\pm 2$  %. Mají taktéž poměrně velký teplotní rozsah pro měření, konkrétně od  $-40$  do  $+100$  °C. Z grafu na obrázku 8 lze vyčíst, že čím nižší je rezistence (odpor), tím vyšší je relativní vlhkost [1, 10].

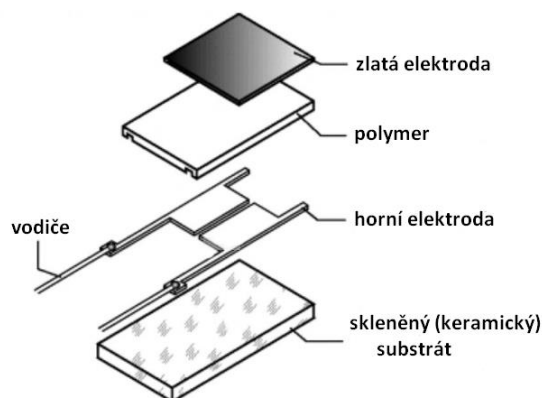


Obrázek 8: Závislost rezistence na relativní vlhkosti [10]

#### 2.5.4 Kapacitní vlhkoměry

Princip kapacitního vlhkoměru je podobný jako u odporových vlhkoměrů. Využívá se zde opět schopnosti některých látek pohlcovat vodní páry, přičemž tentokrát tvoří hygroskopický polymer dielektrikum kondenzátoru. Materiál pohlcuje, resp. vypařuje vodní páru z okolního prostředí, což má za následek změnu permitivity  $\epsilon_r$  kondenzátoru, se kterou se taktéž mění jeho kapacita. Výsledná hodnota je porovnána s hodnotou kapacity v suchém stavu a je přímým parametrem pro určení relativní vlhkosti. Důležitou částí kondenzátoru je jedna pórovitá elektroda, která umožňuje kontakt okolního vzduchu s dielektrikem.

Senzor kapacitních vlhkoměrů je složen ze substrátu, který slouží jako nosná deska (většinou ze skla, teflonu či keramiky), dále ze základní elektrody (zlato, chrom nebo nikl), následně z již zmíněného hygroskopického materiálu, který slouží jako dielektrikum (většinou polymer) a z horní elektrody, jež je propustná pro molekuly vody. Schéma senzoru je uvedeno na obrázku 9 [2].



Obrázek 9: Schéma kapacitního vlhkoměru

Výhodou kapacitních vlhkoměrů je malá závislost na teplotě, odolnost vůči kondenzaci, a taktéž dobrá odolnost při kontaktu s různými chemikáliemi či vyššími teplotami. Pořizovací náklady jsou poměrně nízké [10].

### 3 Přístroje TESTO

Mezi nejpoužívanější a nejmodernější přístroje pro měření vlhkosti patří v dnešní době přístroje od společnosti Testo a.s. Tato firma se v oboru technologie měření řadí mezi světovou špičku a v oblasti přenosných a stacionárních měřicích technologií je dokonce celosvětovým lídrem. Společnost Testo a.s. má sídlo v Německu, konkrétně v obci Lenzkirch.

Firma navrhuje, vyrábí a dodává přístroje pro měření po celém světě. Specializuje se na přístroje pro měření emisí, tlaku, teploty, rychlosti, analýzy plynů, a dále na zařízení pro měření kvality vzduchu, světla a zvuku v místnostech, a v neposlední řadě na přístroje pro měření vlhkosti. Společnost se také věnuje výzkumu nových inovativních řešení pro měření např. kvality potravin, emisí, v oblasti klimatizace a větrání či stavební technice [11].

#### 3.1 Vlhkostní a teplotní sonda

Zařízení pro měření vlhkosti od firmy Testo a.s. je např. vlhkostní a teplotní sonda (obrázek 10) s průměrem sondy 12 mm, která měří vlhkost s vysokou přesností (až do  $\pm 1\%$  relativní vlhkosti) díky své schopnosti vyhodnocovat naměřené hodnoty přímo uvnitř v sondě. Měřicí rozsah je od  $-20$  do  $+70$  °C a je vhodná pro měření relativní vlhkosti

ve skladech či na pracovištích [11].



Obrázek 10: Vlhkostní a teplotní sonda Testo [11]

### 3.2 Termohygrometr

Dalším přístrojem je např. Testo 625, tzv. termohygrometr (obrázek 11). Je schopen měřit jak teplotu, tak relativní vlhkost vzduchu, dále i teplotu mokrého teploměru a rosný bod. Výhodou tohoto přístroje je přenosná hlavice sondy, která se dá v případě měření na těžko přístupných místech sejmout. Hlavice se poté nasune na rukojeť s kabelem a umožní obsluze přístup na tato místa [11].



Obrázek 11: Testo 625 - termohygrometr s rukojetí [11]

### 3.3 Vlhkoměry

Obdobným typem přístrojů, které firma Testo a.s. nabízí, jsou vlhkoměry pro měření vlhkosti materiálů. Mezi tato zařízení patří např. Testo 606-1 (obrázek 12), který se používá pro přesné měření vlhkosti měkkého a tvrdého dřeva a dalších stavebních materiálů. Vlhkoměr obsahuje dvě elektrody ve formě hrotů, které se vpíchnou

do měřeného vzorku a spolehlivě změří vlhkost daného materiálu. Výhodnou funkcí vlhkoměru jsou v paměti uložené křivky materiálů, které umožňují zobrazení vlhkosti materiálů v hmotnostních procentech (např. pro bukové, smrkové, modřínové a dubové dřevo a pro stavební materiály - cementový potěr, beton, sádku, anhydritový potěr, cementovou maltu, vápennou maltu a cihlu) [11].



Obrázek 12: Testo 606-1 pro měření vlhkosti materiálů [11]

## 4 Senzor vlhkosti na bázi optických vláken

Metoda, využívající optická vlákna k určení relativní vlhkosti, patří mezi jedny z nejmodernějších způsobů, které se během posledních let dostaly do popředí pozornosti všech vědců zabývajících se touto problematikou. Jedná se o senzory miniaturní velikosti, velice citlivé na změny vlhkosti, s velmi rychlou časovou odezvou. Elektromagnetické rušení na ně nemá vliv. I to je důvodem, proč se v dnešní době stále více experimentuje s různými návrhy senzorů na této bázi a zjišťuje se jejich nejideálnější složení. Jejich využití je všestranné – od medicínských problémů až po kontrolu průmyslové výroby.

Senzory vlhkosti na bázi optických vláken, které v dnešní době můžeme najít na trhu, jsou založeny na různých strukturách – např. na jednovidových optických vláknech, plastových optických vláknech, vláknech bočně leštěných, kuželových vláknech, vláknech fotonického krystalu, vláknových mřížkách apod. Základním stavebním prvkem senzorů relativní vlhkosti je především použití vhodného materiálu, který je citlivý na změnu vlhkosti, a tím pádem schopný vyvolat sekundární účinky jako např. změnu indexu lomu či namáhání snímacího vlákna, což má za důsledek posunutí výstupních spekter nebo změnu intenzity. Ač se tyto metody, využívající optická vlákna jako senzory relativní vlhkosti stále vyvíjejí, a jsou hojně využívány v nejrůznějších měřeních a aplikacích, nemohou plně nahradit starší metody. Všechny tyto senzory totiž využívají



při výrobě sondy velmi drahé technologie, a v některých případech je dokonce sonda příliš křehká a náchylná k destrukci. A zároveň senzory trpí kolísáním výkonu. Proto je nutné tento výzkum nadále podporovat a hledat neoptimálnější složení senzorů tak, aby jejich zhotovení nebylo příliš nákladné, avšak zároveň aby neztratily nic ze své spolehlivosti a vysoké citlivosti.

Charles Fabry a Alfred Perot představili světu na konci 19. století článek, kde popisovali svůj přístroj, Fabry-Perotův interferometr. Ač je toto zařízení hojně využíváno v několika odvětvích vědy, především fyzice a astrofyzice, jeho autoři jsou prakticky neznámí.

## **4.1 Fabry-Perotův interferometr**

### **4.1.1 Charles Fabry a Alfred Perot**

Charles Fabry, celým jménem Maurice Paul Auguste Charles Fabry, se narodil 11. června 1867 ve francouzském městě Marseille. Studoval na Polytechnické škole v Marseille a v roce 1892 získal doktorát za svou disertační práci, ve které se věnoval teorii viditelnosti a orientaci interferenčních proužků. V roce 1894 se na univerzitě v Marseille připojil k Jules Macé de Lepinayho laboratoři. Věnoval se v ní hlavně optice a právě tady se setkal se svým budoucím dlouhodobým spolupracovníkem Alfredem Perotem a později i s Henri Buissonem. Fabry během svého života publikoval téměř 200 vědeckých prací, napsal 14 knih a více než 100 vědeckých článků. Po osvobození Francie po druhé světové válce se uchýlil do Paříže, kde koncem roku 1945 zemřel [12].

Alfred Perot, jehož celé jméno zní Jean-Baptiste Gasprad Gustav Alfred Perot, pochází z města Mety na severovýchodě Francie, kde se narodil 3. listopadu 1863. Od roku 1882 studoval v Paříži na École Polytechnique, což je nejvýznamnější francouzská vysoká škola s technickým zaměřením. V roce 1888 úspěšně obhájil svou doktorandskou práci na téma „Měření specifických objemů saturačních par a měření mechanického ekvivalentu tepla“ [13]. O šest let později se na vědecké fakultě Marseillské Univerzity setkal s Charlesem Fabrym, se kterým dosáhl největšího úspěchu, když v roce 1899 předvedli světu Fabry-Perotův interferometr. Alfred Perot zemřel 28. listopadu 1925 v Paříži [12].

### 4.1.2 Interference světla

K interferenci dochází při současném šíření dvou nebo více světelných vln, které se navzájem prolínají a v daném bodě se jejich intenzity buď vzájemně zesilují, nebo zeslabují, či dokonce ruší. Tento interferenční jev můžeme pozorovat pouze mezi koherentními vlnami (tzn. vlny o stejné frekvenci, směru kmitání i fázi) [14].

### 4.1.3 Historie Fabry-Perotova interferometru

Poté, co se v roce 1894 Charles Fabry a Alfred Perot setkali na Univerzitě v Marseille, začali spolu pracovat na návrhu a konstrukci multipaprskového interferometru, založeném na teorii, kterou Fabry vypracoval během svého působení na lyceích. Do roku 1902 vydali dohromady Fabry a Perot 15 článků pojednávajících o interferometru a popisujících jeho využití v různých odvětvích – např. meteorologii či astrofyzice.

První úspěch zaznamenali Fabry a Perot poté, co objevili malé systematické chyby v dřívějších pracích zabývajících se slunečním spektrem, především v práci amerického fyzika H. A. Rowlanda. Pomocí interferometru proměřili výsledky, které uváděl Rowland, a s nově naměřenými hodnotami prokázali, že vlnové délky přicházející ze Slunce, jež byly získané z mřížkových spekter, byly příliš vysoké. Získané výsledky vynesli do grafu a společně s úplným spektrem, které udával Rowland, mohli poskytovat přesné standardy vlnové délky skrz celé viditelné spektrum. Tento výzkum byl nadšeně oslavován a především hojně využíván fyziky a astrofyziky po celém světě. Na základě této studie vydali Fabry a Perot společně s Henri Buissonem práci, ve které navrhli přesné hodnoty vlnových délek několika důležitých spektrálních čar. Tato práce následně vedla k zavedení mezinárodního systému standardů vlnové délky. Především díky této skutečnosti se Fabry-Perotův interferometr stal preferovaným nástrojem používaným pro měření vlnových délek, jelikož byl velice přesný.

Interferometr byl prvně detailně popsán Charlesem Fabrym a Alfredem Perotem a je jedním z nejzákladnějších kamenů vědy pro oblast optiky a spektroskopie. Samotný nástroj je často popisován jako jednoduchý a především všestranný, vědci jej používali už od počátků výzkumu atomové fyziky a používají jej dodnes. Jeho největší přednosti jsou měření jemné a extra jemné struktury v atomových spektrech, přesné měření velikosti a rychlosti světla a taktéž přispívají ke studiím změny izotopů a jaderné struktury [13].

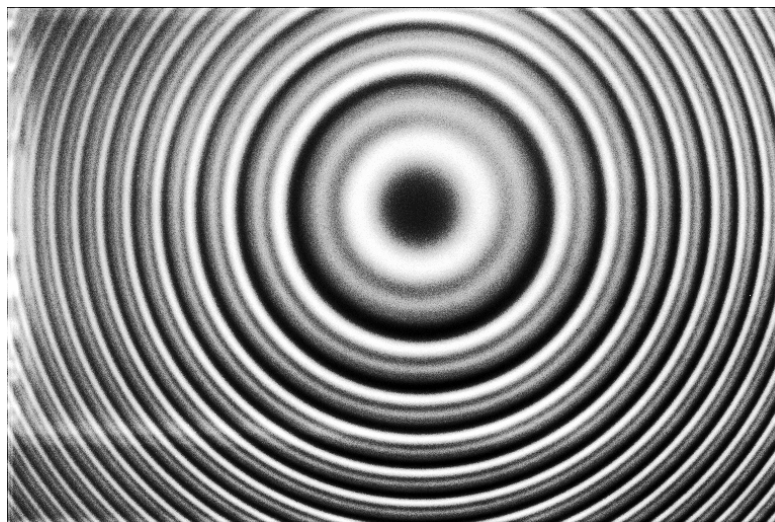
#### 4.1.4 Vývoj Fabry-Perotova interferometru

Přístroje, srovnatelné s Fabry-Perotovým interferometrem, do té doby byly především difrakční mřížky, které byly zdokonaleny H. A. Rowlandem, a dvou-paprskový interferometr, který představil americký fyzik Albert Abraham Michelson. V jedné ze svých prací Fabry a Perot mimo jiné definují přesné technické požadavky na jejich přístroj: plochy, které jsou obráceny proti sobě, musí být přesně rovnoběžné, přičemž je vhodné mít možnost zmenšit či zvětšit jejich vzdálenost, aniž by se narušila jejich rovnoběžnost. Tento požadavek byl základem úspěšnosti jejich měření. Při měření délky zjistili, že pomocí superpozice proužků je možné stanovit referenční polohu v řádu několika tisíců mikrometru. Pro měření velkých tloušťek používali konvergentní světlo s dalekohledem zaměřeným na paralelní paprsky a desky rovnoměrného rozestupu. Dohromady vydali Perot a Fabry 15 článků a v roce 1902 již byly hlavní principy použití interference mezi dvěma postříbřenými deskami všeobecně známy. Jejich technika byla převzata jinými laboratoři a jiní vědci oceňovali přesnost těchto metod [13].

#### 4.1.5 Fabry-Perotův interferometr v dnešní době

Dnešní podoba Fabry-Perotova interferometru se nijak zásadně nezměnila od původního typu, který jeho vynálezci představili na konci 19. století. Zařízení tvoří dvě odrazná zrcadla, která jsou částečně postříbřená a mají mírně klínovitý profil. Reflexní povrchy jsou obráceny proti sobě ve vzdálenosti v rozsahu mikrometrů až centimetrů. Světelný paprsek, přicházející z difuzního zdroje, projde prvním zrcadlem a při dopadu na druhé zrcadlo je rozdělen na dvě části. Menší část paprsku je přenesena skrz zrcadlo, přičemž větší část je odrazena. Dojde ke změně amplitudy, což je zapříčiněno rozdělením světelné vlny na rozhraní prostředí, kdy se původní hodnota amplitudy rozloží mezi dvě nově vzniklé vlny (platí, že amplituda původního světelného paprsku je větší než amplituda odraženého paprsku, a ta je větší než amplituda přeneseného paprsku). Zároveň se také změní fázový posun odraženého paprsku. Většina světelných paprsků je opakovaně odrazena reflexním povrchem zpět k prvnímu zrcadlu a pouze malá část je přenesena, což umožňuje spoustu následných odrazů a přenosů mezi zrcadly. Výsledkem je několik světelných vln, které navzájem interferují a jsou zaostřovány čočkou na obrazovku. Výsledný interferenční obrazec je sestaven z několika soustředných prstenců, přičemž ostrost těchto prstenců závisí na odrazivosti rovných ploch. Pokud je jejich odrazivost vysoká, pak procházející monochromatické světlo vytvoří sadu úzkých světlých

interferenčních kroužků na tmavém pozadí, u kterých je dobře viditelné jemné dělení. Tento obrazec je znázorněn na obrázku 13 [13, 15].



Obrázek 13: Obrazec interferenčních kroužků vzniklý použitím Fabry-Perotova interferometru [15]

## 4.2 Fabry-Perotův senzor vlhkosti na bázi chitosanu

### 4.2.1 Chitosan

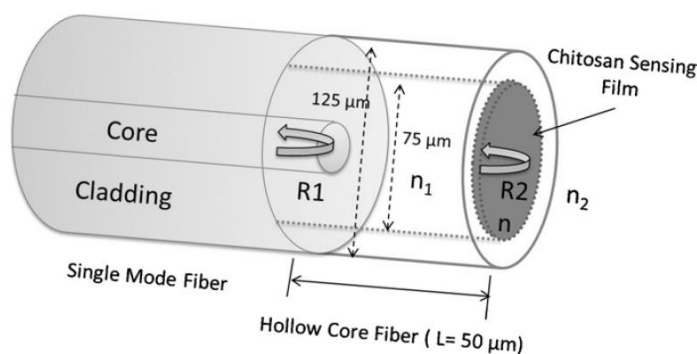
Chitosan je chemická látka, která se získává z chitinu, jehož zdrojem jsou především schránky korýšů – krabů, raků či mušlí. Jeho největší předností a důvodem, proč je využíván např. v medicíně či zemědělství, je jeho schopnost vázat na sebe těžké kovy. Chitosan při reakci se zásadou vytváří přirozený polymer, který je dobře rozpustný ve vodě. Jedná se o polysacharid, který je pro lidské tělo nevstřebatelný, a proto se hojně používá jako komerční přípravek. V zemědělském odvětví se používá k ošetření semen v boji proti plísňovým infekcím a taktéž ke konzervaci potravin, v medicíně k pomalému uvolňování léčiv z tablet, či k hojení ran a k buněčné stimulaci [16].

### 4.2.2 Fabry-Perotův interferometr na bázi chitosanu

Interferometr, který je popisován v této kapitole, je velice citlivý na jakékoli změny, má rychlou časovou odezvu a jeho výroba je jednoduchá. Snímací sonda tohoto senzoru je navržena tak, že je tvořena spojením vlákna s dutým jádrem s jednojádřovým vláknem. Vrstva, sloužící k snímání, je umístěna na špičce vlákna s dutým jádrem. Celý senzor je potažen přírodním semikrystalickým polysacharidovým polymerním materiálem – chitosanem. Konstrukce senzoru umožňuje prostřednictvím vodíkových vazeb

reverzibilní adsorpci molekul vodní páry z plynného skupenství. Chitosan je velice citlivý na vlhkost, v přítomnosti vodní páry zvětšuje svůj objem (doslova otéká). Nevykazuje téměř žádnou absorpci v rozsahu vlnové délky 300 – 2700 nm a projevuje vynikající schopnost tvořit membránu prostřednictvím tvorby tenké snímací vrstvy přes špičku vlákna s dutým jádrem, jež pracuje jako odrazné zrcadlo pro Fabry-Perotův interferometr. Princip snímání vlhkosti využívá inherentní charakteristiky Fabry-Perotova interferometru tak, že jednojádrové, splétané duté vlákno, potažené chitosanem, při změně relativní vlhkosti v okolním prostředí zvětší svůj objem. Tento jev ovlivní délku Fabry-Perotovy dutiny, takže fázový rozdíl sekvenčních odražených světelných paprsků je následně modulován. Monitorováním změny interferenčních proužků, odrážejících se od dvou rozhraní, můžeme získat informaci o relativní vlhkosti zkoumaného prostředí.

Na obrázku 14 je uvedeno schematické uspořádání Fabry-Perotova senzoru vlhkosti. Konstrukce se skládá z jednojádrového vlákna o průměru 8 až 125 nm, vlákna s dutým jádrem o délce 50  $\mu\text{m}$  a průměru 75 až 125 nm a tenké snímací chitosanové vrstvy, pokrývající špičku dutého vlákna. Dále v uvedené konstrukci najdeme Fabry-Perotovu dutinu, ve které se nachází dvě odrazná zrcadla, umístěna proti sobě, jednojádrové duté vlákno a rozhraní mezi dutým vláknem a vrstvou s chitosanem [17].



Obrázek 14: Schematické uspořádání Fabry-Perotova senzoru vlhkosti na bázi chitosanu [17]

#### 4.2.3 Výroba senzoru

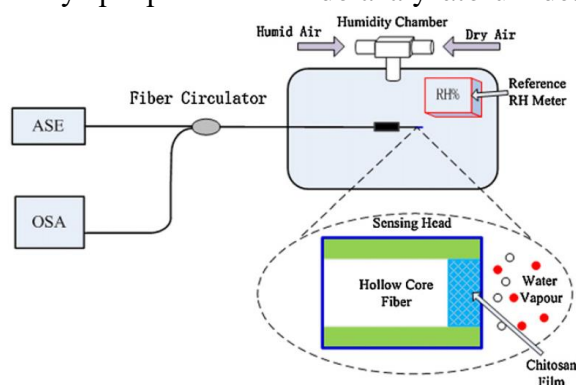
Na výrobu chitosanové vrstvy byla na základě studie použit 1% chitosan, jelikož se zjistilo, že právě tato hodnota koncentrace vytvoří neoptimálnější membránu, ze které je pak možné vyrobit tenkou a plochou vrstvou, jež pokrývá špičku vlákna. Byl-li použit 2% chitosan, membrána byla příliš hustá a nerovnoměrná, a naopak při 0,5% koncentraci byl

roztok příliš zředěný a ztrácel schopnost udržet si svoji mechanickou pevnost. Výsledný 1% roztok chitosanu byl vytvořen rozpuštěním 1 g chitosanového prášku ve 4% roztoku kyseliny octové a následně byl magneticky míchán po dobu 24 hodin při pokojové teplotě až do úplného rozpuštění.

Pro výrobu senzoru bylo používáno standardní jednovláknové vlákno, které bylo štěpeno pomocí velmi přesného zařízení pro zajištění kvality čelní plochy vlákna, která poskytuje přibližně 4 % odrazivosti. Dobře rozštěpené jednovláknové vlákno bylo následně spojeno s vláknem s dutým jádrem s použitím splétače vláken k vytvoření miniaturní mezery. Poté bylo vlákno s dutým jádrem dále štěpeno pod mikroskopem pro dosažení požadované délky dutiny. Jednovláknové vlákno se vzniklou mikroductinou a 1% chitosanovým roztokem bylo následně umístěno do sušící komory pro vytvoření tenké snímávací chitosanové membrány [17].

#### 4.2.4 Experiment

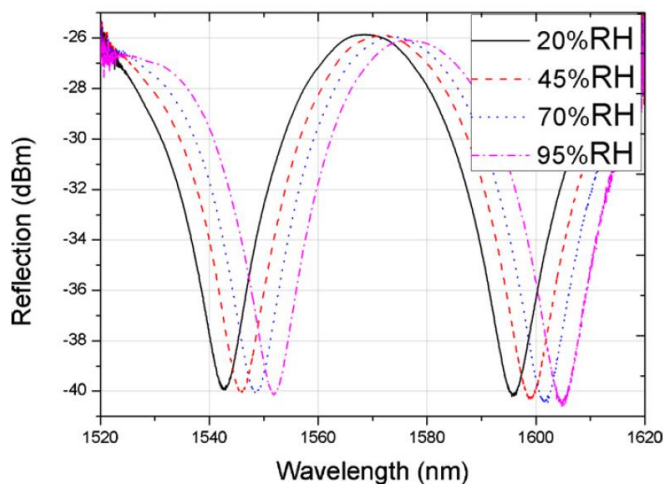
Navržený systém snímání vlhkosti pomocí optických vláken je znázorněn na obrázku 15. Skládá se ze zesílené spontánní emise realizované širokopásmovým světelným zdrojem, Fabry-Perotovy snímávací sondy, analyzátoru optického signálu a oběhu optických vláken. Nekoherentní světlo emitované ze světelného zdroje je nejprve přivedeno do jednovláknového vlákna oběhu. Jedno z výstupních jednovláknových vláken je připojeno k analyzátoru a druhé výstupní vlákno je spojeno se snímávací sondou. Světelné vlny se šíří podél jednovláknového vlákna přes cirkulaci oběhu optických vláken až do snímávací sondy. Zlomek tohoto dopadajícího světla (přibližně 4 %) se odráží na konci jednovláknového vlákna a světlo, které je odesíláno z konce vlákna, je promítáno na membránu a opět odráženo. Tyto dva odražené paprsky jsou slučovány přes stejný spojovací člen a přenášeny zpět podél vlákna do analyzátoru k detekci [17].



Obrázek 15: Experimentální nastavení systému měření vlhkosti [17]

Experimentální měření vlhkosti se provádí ve vzduchotěsné komoře s řízenou vlhkostí. Snímací sonda potažená chitosanem je namontována a upevněna tak, aby bylo zabráněno ohybu a vibracím. V těsné blízkosti je umístěn kalibrovaný komerčně dostupný vlhkoměr se známou absolutní citlivostí k poskytnutí referenční hodnoty pro navrhovaný senzor za stejných testovacích podmínek. Vlhkost komory je řízena průtokem ( $\sim 0,811 \text{ m}^3/\text{h}$ ) suchého a vlhkého vzduchu. Vzduch, který probublává vodou (vlhký vzduch) zvyšuje relativní vlhkost komory na 95 %, zatímco procházející suchý vzduch snižuje relativní vlhkost na 20 %. Teplota, při které je experiment prováděn, je udržována na 25 °C.

Tento senzor byl testován na relativní vlhkost v rozsahu od 20 % do 95 % s krokem 5 % a zároveň byl sledován a zaznamenáván posun vlnových délek interferenčních proužků. Během experimentu bylo vyhrazeno 45 min pro dosažení rovnováhy na každé úrovni vlhkosti mezi vlhkostní komorou a snímací sondou potaženou chitosanem. Všechna měření byla provedena třikrát, aby byla zajištěna opakovatelnost a možnost lepšího odhadu výsledků. Na obrázku 16 jsou znázorněna různá odrazová spektra snímací sondy na odlišných hodnotách relativní vlhkosti – konkrétně 20 %, 45 %, 70 % a 95 %, kde je možné vidět významný fázový posun interferenčních proužků. Zjistilo se, že posun probíhá směrem k delším vlnovým délkám a je lineární s rostoucí relativní vlhkostí. Posun interferenčních proužků je zapříčiněn otékáním chitosanu, což způsobuje změny optické dráhy tvořené vyzařovanými světelnými paprsky a vede k posunu vlnových délek v odezvě na modulaci optické dráhy [17].



Obrázek 16: Posun vlnových délek senzoru při vystavení prostředí s relativní vlhkostí [17]

Vypočtená citlivost senzoru na relativní vlhkost je stanovena na 0,13 nm/% RH, což je více než u jiných vláknových sensorů na bázi detekce rezonanční vlnové délky. Odchylka senzoru je menší než  $\pm 0,22$  nm, což odpovídá nejistotě hodnoty relativní vlhkosti  $\pm 1,68$  %. Pro zjištění rychlosti časové odezvy byl senzor umístěn do vlhkostní komory a podroben rychlé změně relativní vlhkosti (z 50 % na 80 %). V experimentu byl použit nastavitelný laser a fotografický detektor. Senzor byl nejprve ponechán v komoře k ustálení na hodnotu relativní vlhkosti 50 % a poté vystaven skokové změně otevřením dvířek komory, kde relativní vlhkost prostředí byla 80 %. Doba odezvy, která představuje čas potřebný k tomu, aby senzor dosáhl 90 % své konečné hodnoty, byla stanovena z časově závislé odezvy senzoru. Výsledný čas odezvy senzoru činí 380 ms, což je lepší než u jiných konfigurací optických vláken, které většinou dosahují časové odezvy v řádech sekund. Rychlost časové odezvy lze přičíst především miniaturní velikosti snímací vrstvy, která umožňuje rychlý rozptyl molekul vodní páry. Posledním experimentem, kterému byl tento senzor vystaven, byl test stability. Prováděl se při konstantních relativních vlhkostech 35 %, 60 % a 90 %. Výsledkem byla dobrá stabilita se zanedbatelnými odchylkami odezvy vlnové délky (méně než 15 pm) po dobu 100 min [17].

## 5 Organické senzory vlhkosti

### 5.1 Úvod

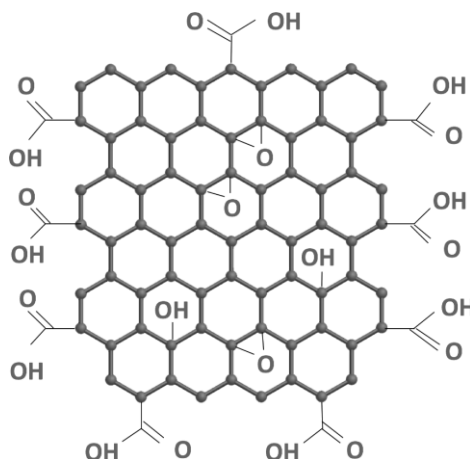
Organické materiály se zdají jako vhodná alternativa pro výrobu elektronických součástek díky své malé hmotnosti, dobré pružnosti, snadnému zpracování a poměrně nízkým nákladům. Např. polyimidové polymery jsou vynikajícím materiálem pro snímání vlhkosti. Jejich elektrické vlastnosti, jako je kapacita a odpor, jsou sledovány v závislosti na množství absorbované vody. Kapacitní vlhkostní senzor využívá změnu permitivity polymerového dielektrika, zatímco odporový senzor reaguje na změnu elektrického odporu s relativní vlhkostí. Výhody kapacitního typu vlhkostního senzoru oproti odporovému senzoru spočívají v tom, že spotřebovává méně energie a má mnohem lepší linearitu. Měření odporu je však mnohem jednodušší a přímější než měření kapacity. Vlastnosti a účinnost elektronických zařízení však silně závisí na povaze materiálu a jeho zpracování, konstrukci a způsobu výroby [18]. Organické materiály, zmíněné v této kapitole jsou grafen (konkrétně oxid grafenu), uhlíkové nanotrubičky, ftalocyanin (konkrétně AlPcCl, tedy ftalocyaninchlorid hlinitý), PEDOT:PSS, nanokompozit celulóza-polypyrrrol,



kompozit ZnO – SiO<sub>2</sub> a kompozit grafen – oxid titaničitý.

## 5.2 Senzor vlhkosti na bázi grafenu

Senzory vlhkosti založené na bázi grafenu, konkrétně na oxidu grafenu (jedná se o uhlíkovou mřížku, ve které jsou některé uhlíky spojovány atomy kyslíku a tvoří epoxidový můstek, viz obrázek 17 [19]), využívají kapacitního principu. Grafen je forma uhlíku s velmi pozoruhodnými mechanickými, fyzikálními a elektrickými vlastnostmi a má velký potenciál pro ultrazvukovou detekci. Senzory založené na grafenu připraveném mikromechanickým štěpením grafitu nebo redukcí oxidu grafenu vykazují velmi vysokou citlivost na plyny. Chemické skupiny ve struktuře oxidu grafenu obsahují kyslík, který může zvýšit citlivost senzorů na vodu. Navíc tyto skupiny umožňují elektricky izolovat oxid, což je vhodné pro následné zabudování oxidu grafenu do kapacitních senzorů [20].



Obrázek 17: Molekulární struktura oxidu grafenu [19]

Výroba senzoru vlhkosti na bázi oxidu grafenu spočívá nejdříve ve vytvoření mikroskopických interdigitálních elektrod. Dalším krokem je zhotovení samotného senzoru s použitím oxidu grafenu jako izolovaného materiálu pro snímání vlhkosti. Kapky rozpuštěného oxidu grafenu v etanolu byly pipetou nakapány na interdigitální elektrody, a poté byl celý preparát vysušen při teplotě 45 °C po dobu 1 hodiny. Různé parametry senzoru byly testovány – např. závislost kapacity senzoru na vlhkosti při různých hodnotách frekvence (konkrétně 100 Hz, 1 kHz a 10 kHz), kdy se zvyšující se úrovní RH roste výstupní kapacita, přičemž čím nižší je frekvence, tím méně je kapacita závislá na vlhkosti. Důvodem je pomalá změna směru elektrického pole při nízkých frekvencích a objevuje se polarizace absorbované vody v nábojovém prostoru. Senzor byl opakovaně testován při pevných hodnotách vlhkostí (15 %, 35 %, 55 %, 75 % a 95 %) v průběhu 30 dnů a výsledné kolísání jeho stability bylo neoptimálnější při frekvenci 1 kHz a tvořilo

méně než 6 %. Doba odezvy senzoru byla testována v rozmezí od 23 % RH do 86 % RH a výsledný čas odezvy byl 10,5 s a doba zotavení (od 86 % do 23 % RH) byla 41 s [20].

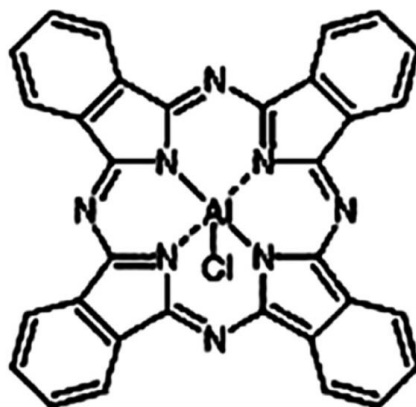
### 5.3 Kapacitní senzor vlhkosti založený na kapilárním kondenzačním efektu vícevrstvých uhlíkových nanotrubic

Uhlíkové nanotrubice mají mnoho zvláštních vlastností, jako je velký poměr povrchu a objemu, vysoká povrchová aktivita či dobrý výkon při absorpci. Pro tento typ senzoru vlhkosti byla jako substrát použita měď a vrstva, která je smíchaná s práškem z vícevrstvých uhlíkových nanotrubic a oxidem křemičitým a na substrát je aplikována síťotiskem. Pro zlepšení citlivosti senzoru byly uhlíkové nanotrubice obohaceny o hydroxylové a karboxylové skupiny. Vícevrstvé uhlíkové nanotrubice mají porézní struktury, které jsou využívány při vstřebávání vodních par. Vzhledem k existenci těchto kapilárních pórů je pro jejich nasycení a následnou kondenzaci na kapalinu zapotřebí méně molekul par z nižší hladiny RH. Kondenzace se proto může vyskytovat v těchto kapilárních pórech dříve při nižší hladině relativní vlhkosti, než při normálním tlaku nasycených par při vysoké relativní vlhkosti nebo dokonce 100% relativní vlhkosti. V důsledku kondenzace vodních molekul se mění dielektrická konstanta snímače  $\epsilon$  a kapacita snímače se liší při různé relativní vlhkosti. K detekci kapacitních signálů pro snížení spotřeby energie se používá obvod pro měření kapacity a napětí. Obvod exportuje signál jako formu stejnosměrného napětí, které se mění lineárně podle změny kapacity.

Experimenty byly prováděny v uzavřené skleněné nádobě, která poskytuje stabilní a nastavitelnou úroveň relativní vlhkosti (v rozmezí od 11 % do 97 % RH) při stejné teplotě (25 °C). Výsledná hodnota kapacity se změnila z 6,1 pF na 8,9 pF při změně relativní vlhkosti z 97 % na 11 % RH. Výsledná doba odezvy (při změně relativní vlhkosti z 11 % na 86 % RH) činí 45 s a doba zotavení 15 s. Dalším důležitým parametrem, který byl pro tento senzor vlhkosti testován, byl vliv teploty, přičemž teplotní charakter senzoru byl měřen od 25 °C do 65 °C. Výsledky ukázaly, že odezva snímače na relativní vlhkost se s rostoucí teplotou snižuje. Je to způsobeno tím, že vyšší teplota může usnadnit odpařování vody, a tím pádem množství vody v mikrodutině ve vrstvě klesá, a tak se snižuje odezva senzoru. Tento typ senzoru ukázal, že použití vícevrstvých uhlíkových nanotrubic může účinně snížit tlak nasycených par, a tím zvýšit testovací rozsah [21].

## 5.4 Senzor vlhkosti na bázi ftalocyaninchloridu hlinitého

V tomto typu senzoru byl použit materiál ftalocyaninchlorid hlinitý (AlPcCl), zakoupen od firmy Sigma Aldrich, který je netoxický, má dobrou stabilitu při vysoké teplotě jak ve vakuu, tak ve vzduchu, a také má dobrou chemickou stabilitu. Jeho molekulární struktura je znázorněna na obrázku 18. Vlastnosti tohoto materiálu jsou však silně závislé na způsobu přípravy snímací vrstvy, její tloušťce a morfologii [22].



Obrázek 18: Molekulární struktura ftalocyaninchloridu hlinitého [22]

Pro výrobu senzoru byl skleněný substrát ponořen do acetonu a 10 minut čištěn v ultrazvukovém čističi, s následným promytím deionizovanou vodou a sušením. Tenké hliníkové elektrody byly při odpařování ve vakuu pokládány na vyčištěné podklady a mezi dvěma elektrodami se vytvořila mezera 50  $\mu\text{m}$  maskováním skleněného substrátu měděným drátem. Tloušťka hliníkových elektrod je 50 nm a délka mezery 25 mm. Fólie AlPcCl mají nominální tloušťku 50 nm a 100 nm a byly také pokládány přes mezeru mezi předem uložené hliníkové elektrod. Senzor byl testován při teplotě  $19 \pm 0,5$  °C s použitím vlhkostní komory. Pro vytvoření vlhkosti v komoře procházela voda dusíkem, poté byla vstříkována do komory, ve které byla vlhkost měřena komerčním měřičem s přesností  $\pm 2,5$  % RH, kapacita měřena LCR metrem (typ Agilent U1732A) a odpor následně vypočítán z naměřených hodnot. Porézní povrch AlPcCl vrstev zvyšuje elektrickou odezvu na vlhkost. Byly testovány různé tloušťky AlPcCl vrstev, přičemž se zjistilo, že tenká vrstva (o tloušťce 50 nm) vykazuje vyšší citlivost, než tlustá vrstva (100 nm). Důvodem je vyšší koncentrace molekul vody v důsledku difúze. Odpor vykazoval enormní pokles v rozsahu od 35 % do 92 % RH. S nárůstem frekvence odpor klesal a největší vliv frekvence na relativní vlhkost byl v rozsahu 20 % až 55 % RH. Doba odezvy a zotavení se měřila náhlou změnou hodnoty relativní vlhkosti z 20 % na 92 %, respektive z 92 % na 20 % RH. U snímačů o tloušťce 50 nm je doba odezvy 10 s a doba zotavení 32 s,

zatímco u snímačů o tloušťce 100 nm je doba odezvy 10 s a doba zotavení 50 s. Následně byl senzor žhán při teplotě 100 °C po dobu 1 hodiny, což vedlo k výraznému zlepšení parametrů senzoru. Průměrná citlivost se zvýšila o 30 % u senzoru o tloušťce 50 nm a 40 % u senzoru o tloušťce 100 nm. Bylo také pozorováno, že žhání vede ke snížení doby zotavení až na 63% u senzorů s organickou vrstvou o tloušťce 50 nm a 70% u senzorů o tloušťce 100 nm, zatímco doba jejich odezvy u obou byla 10 s. Vysoká citlivost AlPcCl na vlhkost je především způsobena vysokou difuzivitou molekul vody v tenkých vrstvách AlPcCl [22].

## 5.5 Senzor vlhkosti na bázi mikrovlnného rezonátoru a PEDOT:PSS

Materiál, použitý při výrobě tohoto senzoru, je poly(3,4-ethyldioxythiofen) polystyren sulfát, neboli PEDOT:PSS. Jedná se o materiál s vynikajícími vlastnostmi, jako např. vysoká vodivost, snadné zpracování, nízká cena a schopnost pracovat při pokojové teplotě. Vědci zabývající se použitím tohoto materiálu pro snímání vlhkosti již v minulosti publikovali mnoho studií, avšak většinou se setkávali s problémem, kdy jejich metody umožňovaly k odvození výsledku měřit pouze jeden parametr (např. proud, odpor či rezonanční frekvenci). Tento problém odstraňuje metoda využívající mikrovlnné rezonátory, které mohou měřit dva parametry, konkrétně přenosový koeficient procházející rezonátorem a rezonanční frekvenci. Chemická reakce mezi vrstvou PEDOT:PSS a vlhkostí může být dobře pozorována prostřednictvím mikrovlnných elektrických vlastností přenosového koeficientu a rezonanční frekvence. Přenosový koeficient souvisí s vodivostí vrstvy PEDOT:PSS, která je nepřímo úměrná druhé mocnině ohmické ztráty. Zároveň je rezonanční frekvence vztažena ke kapacitě mezi vrstvami PEDOT:PSS, která je nepřímo úměrná druhé mocnině rezonanční frekvence. Kromě toho jsou změny vodivosti a kapacity nezávislé, což znamená, že mohou poskytnout dvojnásobné množství informací.

Pro přípravu vzorku byl navržený senzor vyroben na substrát desky s plošnými spoji o tloušťce 0,762 mm. K vytvoření adhezivní vrstvy byla deska galvanicky pokovována niklem; rezonátor s měděným vzorem byl potažen zlatem, aby se zabránilo oxidaci z vlhkosti, a následně vrstvou PEDOT:PSS. Dále pro zvýšení citlivosti byla snímací oblast umístěna mezi vnější elektrody, což je oblast s nejsilnějším elektrickým polem. Pracovní frekvence mikrovlnného rezonátoru byla stanovena na 2,45 GHz, avšak po nanesení vrstvy PEDOT:PSS na rezonátor se posunula z 2,45 GHz na 2,4 GHz. Je to proto, že vrstva je

vodivý materiál a její nanesení na rezonátor způsobilo zvýšení kapacity povrchu. Rezonanční frekvence byla tedy mírně posunuta do oblasti s nižší frekvencí, přičemž úroveň zesílení přenosového koeficientu se zvýšila. Doba odezvy senzoru se měřila v rozsahu od 5 % do 80 % RH a výsledná hodnota činila 0,5 s. Výsledky rovněž ukázaly, že navrhovaný senzor reagoval na vlhkost v reálném čase a měl vynikající opakovatelnou odezvu.

Chemickou reakci uvnitř senzoru lze ověřit např. měřením změny rezonanční frekvence, a tím mohou být identifikovány i změny kapacity. Tyto změny jsou důsledkem deformace nanosené vrstvy a změny permitivity. S rostoucí RH se molekuly vody kolem PEDOT:PSS akumulují a dochází ke kapilárnímu působení. Meziprostorové štěrbinové PEDOT:PSS jsou vyplněny molekulami vody. Tím dochází k bobtnání vrstvy, což následně zvyšuje její velikost. V důsledku toho se rezonanční frekvence posouvá do oblasti nižších hodnot [23].

## **5.6 Flexibilní vlhkostní senzor na bázi nanokompozitu celulózy a polypyrrolu**

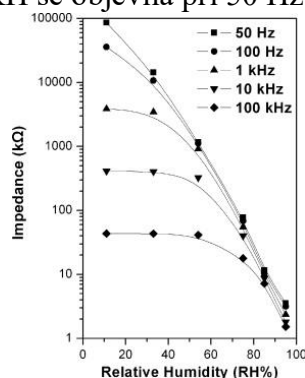
Studie zabývající se měřením vlhkosti se v posledním desetiletí zaměřily na využití celulózy jako substrátu pro senzory vlhkosti. Celulóza je nejrozšířenějším polymerem v přírodě, je nevyčerpatelná, levná a snadno zpracovatelná. Dalším materiálem použitým pro výrobu vlhkostního senzoru je polypyrrol (PPy), který byl vybrán pro svoji biokompatibilitu, dobrou linearitu a rychlé doby odezvy. Spojením celulózy a polypyrrolu vznikl biologicky rozložitelný a flexibilní nanokompozit. Polypyrrolová vrstva o tloušťce v rozsahu nanometrů byla nanášena na povrch celulózy polymerizačně indukovaným adsorpčním procesem. Jedná se o techniku zpracování ultratenkých polymerních vrstev, která zahrnuje ponoření substrátu do polymeračního roztoku tak, aby vznikly rostoucí polymerní řetězce na povrchu substrátu.

Pro vyhodnocení chování snímače vlhkosti v nanokompozitu celulóza-polypyrrol (CP) byly nanášeny interdigitální elektrody. Vlhkostní a teplotně citlivé vlastnosti nanokompozitu CP byly zkoumány zaznamenáním jeho elektrické odezvy pomocí LCR metru (HP 4284A) při různých úrovních vlhkosti a teploty. Frekvence měření byla 200 kHz a úroveň oscilace byla 1 V. Senzor byl umístěn v komoře, kde lze regulovat teplotu

a vlhkost. Kapacita přístroje byla zvolena tak, aby reprezentovala lineární vztah zařízení s ohledem na úroveň vlhkosti. Experimenty ukázaly, že kapacita rostla se zvyšující se vlhkostí z 30 % na 90% RH, zatímco při opačném procesu (z 90 % na 30 % RH) kapacita klesala. Protože pro senzory je klíčovým faktorem linearita, byly testovány senzory s rozdílnou dobou polymerace – konkrétně 3, 6, 9 a 16 hodin. Senzory s dobou polymerace 3 a 6 hodin, a částečně i senzor s dobou polymerace 9 hodin, ukázaly spíše kvadratické chování než lineární. Ukázalo se, že tato doba polymerace nemusí být dostatečná pro vytvoření potřebného množství PPy v celulózové vrstvě. Další test se senzorem s dobou polymerace 16 hodin již vykazoval vynikající linearitu. Doba odezvy (kontinuální zvlhčování od 27,8 % do 94,2 % RH) a doba zotavení (kontinuální odvlhčování od 91,7 % do 28,9 % RH) byla přibližně 418 s (7 s na 1 % RH) [24].

## 5.7 Senzor vlhkosti na bázi kompozitu oxid zinečnatý-oxid křemičitý

K vytvoření kompozitu oxidu zinečnatého a oxidu křemičitého ( $\text{ZnO} - \text{SiO}_2$ ) byla použita metoda sol-gel, která slouží k přeměně kapalného systému na pevnou fázi (gel). Porézní gel byl vyčištěn pomocí chemických procesů a následným žiháním byl získán výsledný materiál [25]. Výroba senzoru spočívala ve smíchání a rozemletí vzorku s deionizovanou vodou v hmotnostním poměru 100:25 za vzniku pasty. Následně byla keramická destička s dvěma interdigitálními zlatými elektrodami potažena vzorkem. Při měření byl senzor vlhkosti umístěn do skleněné nádoby s danou relativní vlhkostí na dobu přibližně 3 minut. Na obrázku 19 je znázorněna závislost impedance kompozitu  $\text{ZnO-SiO}_2$  na relativní vlhkosti při různých frekvencích. Při nízké hodnotě relativní vlhkosti je impedance tím nižší, čím vyšší je použitá provozní frekvence. Při nárůstu RH došlo k překrytí všech pěti křivek, což ukazuje, že při vysoké relativní vlhkosti má různá provozní frekvence jen malý vliv na impedanci. Jak lze vyčíst z grafu, nejlepší linearita křivky závislosti impedance na RH se objevila při 50 Hz a 100 Hz [26].



Obrázek 19: Závislost impedance na relativní vlhkosti při různých frekvencích [26]

Dále byla měřena impedance vzorku při pokojové teplotě, frekvenci 100 Hz a střídavém napětí 1 V. Měření se prováděla s několika vzorky, přičemž každý vzorek obsahoval jiné množství ZnO v celkovém kompozitu. Výsledky ukázaly, že čím více ZnO vzorek obsahoval, tím nižší byla impedance, což ukazuje vysokou citlivost ZnO na vlhkost. V celém rozsahu měření relativní vlhkosti z 11 % na 95 % RH se impedance vzorku změnila o více než čtyři řády s rostoucími hodnotami RH. Výsledná naměřená doba odezvy senzoru (při měření v rozsahu od 11 % do 95 % RH) byla 50 s, přičemž doba zotavení (měření od 95 % do 11 % RH) činila 100 s [26].

## 5.8 Senzor vlhkosti na bázi kompozitu grafen-oxid titaničitý

Kompozit grafen – oxid titaničitý (G-TiO<sub>2</sub>) byl vyroben metodou sol-gel. Materiály z oxidu titaničitého jsou hydrofilní, a proto je jejich využití v oblasti vlhkostní sensoriky poměrně rozšířené. Kompozit G-TiO<sub>2</sub> byl vyroben tak, že k roztoku TiO<sub>2</sub> byl přidán grafen a konečný roztok byl ponechán při pokojové teplotě po dobu několika dnů, dokud nevznikl gelový prášek. Následně byl ještě přidán polyvinylchlorid (PVC) v poměru přibližně 1:1 pro vytvoření vazby v kompozitu. Vrstva citlivá na vlhkost byla vytištěna na dvojici interdigitálních zlatých elektrod umístěných na substrátu z oxidu hlinitého.

Pro měření komplexní impedance senzorů v testovací komoře (frekvence = 1 kHz, použité napětí = 1 V, okolní teplota = +25 °C) při různých úrovních vlhkosti byla použita měřidla indukčnosti a kapacitního odporu (HIOKI 3532-50). Vzorky s různým obsahem kompozitu G-TiO<sub>2</sub> byly testovány, přičemž všechny vzorky vykazovaly vysokou impedanci při nízké relativní vlhkosti. Nejvyšší odezvu snímání na vlhkost vykazoval kompozit G-TiO<sub>2</sub> s 10% hmotnostním zlomkem. Doba odezvy tohoto vzorku byla přibližně 128 s (při změně od 12 % do 90 % RH) a doba zotavení 68 s (od 90 % do 12 % RH) [27].

## 6 Tištěné senzory vlhkosti

### 6.1 Úvod

Vlhkost se dá měřit mnoha způsoby, avšak co je nezbytné pro aplikace senzorů v oblasti životního prostředí, zemědělství či zdravotnictví, je jejich přesnost. V dnešní době mezi široce se rozvíjející nejmodernější technologie k výrobě senzorů vlhkosti můžeme vedle nanotechnologie zařadit i tištěnou elektroniku. Jedná se o relativně nové odvětví k výrobě elektronických zařízení, které se zaměřuje na využití pružných podkladových materiálů, jako jsou plasty, papír a textilní materiály. Tradiční metody tisku, které jsou ve světě známy především díky tiskárenskému průmyslu, se využívají i v této technologii. Např. inkoustové tištění, sítotisk a hlubotiskové techniky jsou aplikovány při výrobě elektronických zařízení, které se používají jako různé senzory, tenzometry či displeje. Mezi novější technologie, které se v oblasti tištěné sensoriky využívají, patří především technologie AJP (Aerosol Jet Printing). Tato metoda umožňuje bezkontaktní nanášení inkoustu ve formě aerosolu na pružný nebo pevný substrát. Inkoust se může skládat ze širokého spektra materiálů, ať už vodivých, dielektrických, biologických nebo na bázi nanočástic. Pro nanášení aerosolu na přesně určenou plochu substrátu je v technologii využíváno aerodynamických vlastností nosného plynu, kterým je dusík. Velkou výhodou této metody oproti ostatním je, že nepotřebuje žádné šablony a předlohy [28].

### 6.2 Tištěný kapacitní senzor vlhkosti – pHEMA

Jedním z řady prototypů, které byly testovány jako velmi přesné senzory vlhkosti, je tištěný senzor vlhkosti založený na kapacitním principu. Tento senzor byl vyroben na pružném polyethylentereftalátovém (zkráceně PET) substrátu. PET patří mezi nejběžnější termoplasty a uplatňuje se především při výrobě vláken, vykazujících vynikající nemačkovost a nízkou navlhavost. Pro metalizaci senzoru, což je proces povrchové úpravy, kdy dochází k nanášení kovových povlaků na materiál, byl použit vodivý stříbrný inkoust na bázi nanočástic. Pro snímací vrstvu byl použit materiál, který má velkou citlivost na vlhkost – hydrofilní polymer pHEMA.

Experiment, který provedli vědci na Michiganské univerzitě, se prováděl s PET substrátem, o šířce 175  $\mu\text{m}$ , dále byl použit polymer pHEMA, jenž byl rozpuštěn v etanolu za vzniku 15 % hmotnostního zlomku. V experimentu byly použity interdigitální



elektrody, které byly vytištěny hlubotiskem s použitím stříbrného inkoustu na bázi nanočástic o průměrné velikosti částic v rozsahu 20 až 30 nm. K výrobě tištěného pružného senzoru vlhkosti byla opět použita metoda hlubotisku. Snímací vrstva, tvořena polymerem pHEMA rozpuštěném v etanolu, byla nanášena na horní část elektrod ve dvou různých tloušťkách. Elektrody byly poté umístěny do vlhkostní komory s řízenou vlhkostí, kde byla zkoumána odezva na změnu prostředí. Pozorování chování senzoru bylo prováděno pomocí přesného LCR metru a následný záznam a analýza byly zprostředkovány přes program LabVIEW. Během experimentu se zjišťovala kapacitní odezva senzoru o tloušťce snímací vrstvy 1  $\mu\text{m}$  v rozsahu měřené vlhkosti od 30 % do 80 % při různých teplotách měřicí komory. Výsledky ukázaly, že procentuální změna kapacity senzoru při relativní vlhkosti 80 % činí

- 172 % při teplotě 25 °C,
- 200 % při 30 °C,
- 390 % při 35 °C

ve srovnání se základními kapacitami při teplotách 25 °C, 30 °C, respektive 35 °C. Lze zde pozorovat schopnost polymeru absorbovat více molekul vody při vyšších teplotách. Taktéž byla testována stabilita plně potištěného tenkovrstvého (tloušťka 1  $\mu\text{m}$ ) senzoru vlhkosti. Experiment probíhal po dobu 20 minut při dvou hodnotách relativní vlhkosti 40 %, respektive 60 % a konstantní teplotě 25 °C ve vlhkostní komoře. Výsledky ukázaly odchylku  $\pm 0,6$  % při 40% relativní vlhkosti a  $\pm 0,8$  % při 60% RH [29].

### 6.3 Tištěný senzor vlhkosti na bázi UHF RFID systému

Dalším testovaným typem vlhkostního senzoru je senzor vytištěný na polyimidový substrát kaptonu. Tento senzor pracuje na principu změny kapacity kaptonu, jež mění rezonanční frekvenci. Je používán pro pasivní radiofrekvenční identifikační systémy (RFID) pracující na ultravysokých frekvencích (UHF), které se pohybují v rozmezí od 300 MHz do 3 GHz [30].

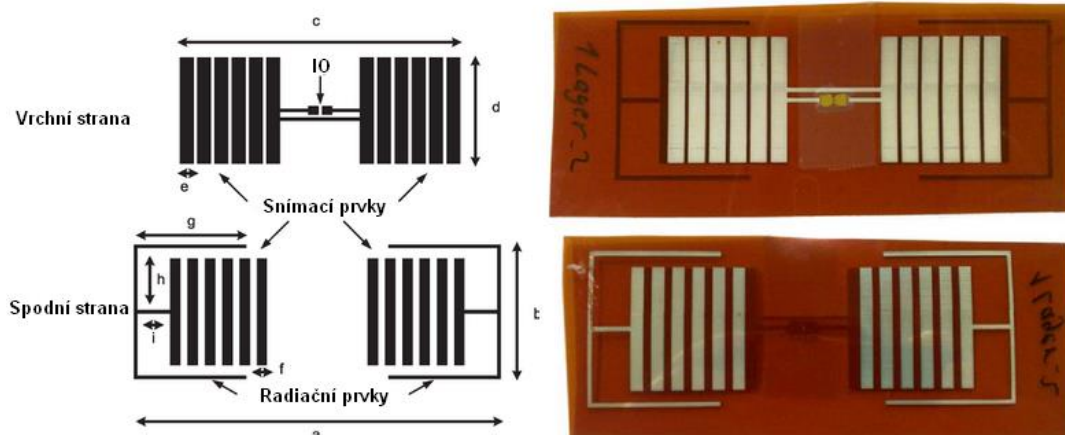
V popředí výzkumu technologie radiofrekvenční identifikace je především snímání RFID štítků. RFID štítky by mohly v budoucnu nahradit čárové kódy. Jelikož existuje velké množství materiálů citlivých na změnu vlhkosti je jednou z nejoblíbenějších a nejpoužívanějších metod pro systémy RFID snímání vlhkosti. Štítek vlhkostního senzoru nachází uplatnění nejen jako senzor vlhkosti vzduchu, ale i jako bezdrátový senzor

vlhkosti, který je schopen indikovat možné poškození zařízení způsobené vodou. Dalším možným využitím je monitorování podmínek prostředí při přepravě různých spotřebních výrobků, jako jsou potraviny a léky.

Hlavní složky pasivních UHF RFID systémů jsou především čtečky, štítky a koncové aplikace (např. databáze). Provoz těchto systémů je založen na vazbě mezi čtečkou a štítkem pomocí elektromagnetických vln, které zároveň slouží k poskytování provozního výkonu pro pasivní RFID štítky, které nemají vlastní napájení. Senzorická část RFID štítku je oboustranná struktura tvořená stříbrným inkoustem na bázi nanočástic (použitým pro vytvoření vodičů) na polyimidové vrstvě kaptonu o tloušťce 125  $\mu\text{m}$ . Senzor se skládá ze tří hlavních částí: senzorové prvky potištěné inkoustem, radiační prvky a integrovaný obvod (konkrétně Higgs 3), který poskytuje základní identifikační funkci čipu. Substrát, kterým je flexibilní a extrémně odolná polyimidová dielektrická vrstva kaptonu, byl vybrán kvůli jeho permitivitě, jež je závislá na vlhkosti prostředí. Zároveň je schopen odolávat vysokým teplotám. Radiační prvek je tvořen krátkou dipólovou anténou. Snímání vlhkosti senzorovým elementem je založeno na permitivitě substrátu. Během změny okolní vlhkosti se změna permitivity transformuje na proměnnou kapacitu s využitím paralelních deskových kondenzátorů. Změna kapacity pak mění impedanci mezi prvky senzoru a integrovaným obvodem, čímž mění realizovaný zisk štítku. Polyimidová vrstva, díky své vnitřní chemické struktuře, je ovlivněna změnami vlhkosti prostředí. Vlhkost ze vzduchu absorbovaná kaptonem způsobuje hydrolytický efekt, který zapříčiní rozpadnutí vnitřní vazby mezi uhlíkem a dusíkem a změny vnitřní elektrickou polarizaci. Ta následně vede ke změně permitivity kaptonu, která je lineární k vlhkosti prostředí. Relativní permitivita polyimidové vrstvy činí 3,05 při relativní vlhkosti prostředí 0 % a teplotě 23  $^{\circ}\text{C}$ . Při zvýšení relativní vlhkosti na 100 % je permitivita vrstvy 3,85.

V praxi se měření vlhkosti provádí pomocí dvou štítků. Jeden působí jako snímač, druhý jako stabilní referenční bod, který je pečlivě navržen tak, aby vykazoval danou frekvenční odezvu. Snímací štítek je přímo vystaven okolní vlhkosti, přičemž referenční bod je stíněn v pouzdru dielektrika nepropustném pro vlhkost. Hladina okolní vlhkosti je odebírána z rozdílu kmitočtů v měřených frekvenčních bodech s nejnižšími hodnotami výkonů snímacího a referenčního štítku. První vzorky těchto senzorů byly vyrobeny v laboratoři pro tisk elektroniky na finské univerzitě v Tampere. Pro tisk byla použita inkoustová tiskárna s rozlišením 600 dpi, typ inkoustu byl Harima NPS-J. Proces

inkoustového tisku vytvořil tloušťku vodiče v rozmezí od 1,0 do 1,5  $\mu\text{m}$  na tiskovou vrstvu. Na obrázku 20 je znázorněno rozvržení tisku senzoru a výsledný vytištěný senzor vlhkosti.



Obrázek 20: Rozvržení senzoru vlhkosti a výsledný vytištěný senzor [31]

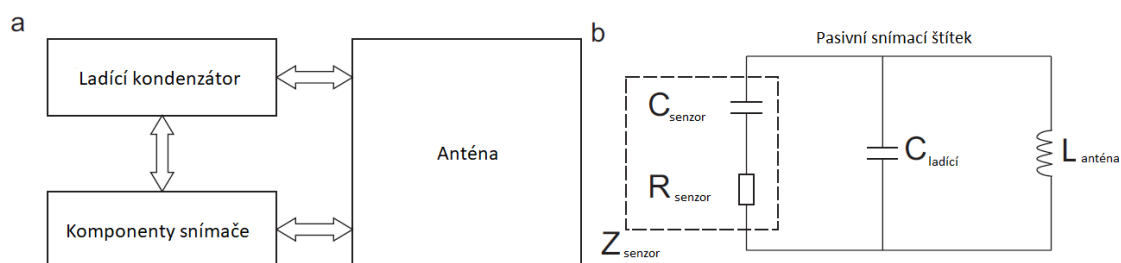
Experiment se prováděl v měřicí komoře při konstantní teplotě okolního vzduchu 24 °C. Senzor byl umístěn do plastové nádoby společně s různými solnými roztoky pro vytvoření stabilních vlhkostních podmínek a ponechán k ustálení po dobu 12 hodin. Výsledky ukázaly vlhkostní citlivost senzoru  $198,8 \pm 14 \text{ kHz} / \% \text{RH}$ , naměřená odchylka v citlivosti umožňuje měření vlhkosti v rozsahu  $\pm 4,0 \%$  relativní vlhkosti. Výsledné rezonanční frekvence měřených vzorků dosáhly hodnot od 860 MHz do 960 MHz, což umožňuje dobrý přenos energie mezi anténou a integrovaným obvodem [31].

#### 6.4 Tištěný RFID senzor na bázi polyelektrolytu

Dalším typem senzorů, které využívají tištěnou technologii, jsou různé druhy štítků pro aplikace v distribuovaném snímání a monitorování. Stále častěji se v dnešní době setkáváme s požadavky na kvalitní, efektivní, spolehlivé, avšak levné senzory k monitorování různých parametrů prostředí. Jedním z náročnějších úkolů je využití těchto senzorů k pozorování parametrů v uzavřených prostředích, včetně potravinových a farmaceutických obalů, uvnitř zvířete, uvnitř stavebních prvků apod., jelikož fyzické spojení mezi senzorem a jednotkou pro zpracování dat je často obtížné a v některých případech dokonce nemožné. Právě pro tyto případy se provádějí výzkumy zabývající se bezdrátovými a dálkovými snímacími systémy. Několik prototypů již bylo vyzkoušeno, přičemž se většinou jedná o kombinaci běžných elektronických sensorových komponentů s technologií RFID. Hlavní překážkou pro použití této technologie jsou vysoké náklady

na výrobu součástek a následná montáž výsledného RFID senzoru. Vlhkost je v dnešní době jednou z největších obav pro stavebnictví, a proto existuje velká poptávka po levném bezdrátovém snímači vlhkosti, který může být vkládán do stavebních materiálů. Zkoumaly se různé hydrofilní materiály, jako je keramika a kompozity, aby se zjistila míra jejich reakce na změnu vlhkosti. Jako neoptimálnější materiály se zatím jeví polyelektrolyty. Tyto materiály, ve kterých jsou polární skupiny kovalentně navázány na polymerní páteř, jsou vhodné, jelikož jsou hygroskopické a vyjadřují velké změny v impedančních charakteristikách při vystavení různým hodnotám vlhkosti. Kromě toho jsou polyelektrolyty snadno tisknutelné pomocí standardní tiskové techniky.

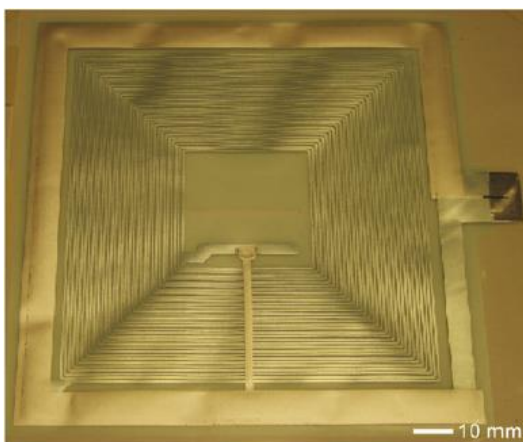
V tomto polyelektrolytovém typu senzoru je použita vytištěná samostatná hlava senzoru, která je založena na polyelektrolytovém derivátu. Dále senzor obsahuje anténu a ladicí kondenzátor sloužící k posunu rezonanční frekvence tištěného štítku snímače do požadovaného kmitočtového pásma. Externí čtečka napájí výsledný tištěný štítek senzoru elektromagnetickou indukcí. Čtení snímače je přenášeno pomocí rezonanční frekvence tištěného štítku snímače, která se mění v závislosti na různých úrovních okolní vlhkosti. Na obrázku 21(a) je uveden funkční blokový diagram a taktéž ekvivalentní elektrický obvod 21(b).



Obrázek 21: (a) Funkční blokový diagram a (b) ekvivalentní elektrický obvod

Rezonanční frekvence je frekvence, při které celková impedance dosahuje minima (při sériovém spojení LC) nebo maxima (při paralelním spojení LC). Jelikož jakákoli změna v impedanci štítku senzoru vede k odpovídající změně impedance uvnitř čtecího obvodu, je tím pádem rezonanční kmitočet čtecího obvodu je závislý na impedanci hlavy snímače, a tím i na úrovni vlhkosti. Tím, že se měří rezonanční frekvence čtecího obvodu, je dosaženo bezdrátového odečtu štítku senzoru. Experiment se prováděl s použitím polyelektrolytového roztoku a antény, jejíž část byla překryta hliníkovou fólií o tloušťce 9  $\mu\text{m}$ . Elektrický odpor této fólie je přibližně 42  $\Omega$  a jeho indukčnost se pohybuje kolem 70  $\mu\text{H}$ . Spodní elektrody pro ladicí kondenzátor a potištěná hlava snímače byly vyrobeny

za sucha pomocí mlecího procesu, což je metoda umožňující vyrábět vodivé struktury na pružných materiálech [32]. Elektrolytický roztok byl následně vytištěn na spodní elektrodu a vysušen po dobu 2 minut při teplotě 90 °C. Dielektrický materiál byl položen sítotiskem tak, aby pokryl celou anténu a spodní elektrodu ladicího kondenzátoru a částečně pokryl elektrolytickou vrstvu. Následně byl vytvrzen pod UV světlem. Na nezakrytou část elektrolytu se nanasla kompozice s vodivým uhlíkem. Pro dokončení výroby ladicího kondenzátoru byla horní elektroda potíštěna tenkou stříbrnou vrstvou, což vytvoří spojovací můstek mezi anténou a hlavou snímače. Výsledný štítek je uveden na obrázku 22.



Obrázek 22: Fotografie výsledného štítku s bezdrátovým senzorem vlhkosti [33]

Všechna měření byla prováděna v klimatické komoře při konstantní teplotě 23 °C, počínaje na nízké hodnotě relativní vlhkosti 10 % a končící na hodnotě relativní vlhkosti 90 %. Bylo zjištěno, že se zvyšující se vlhkostí se snižuje jak reálná, tak imaginární část impedance. Fázový úhel při nízkých frekvencích je obvykle kolem -80 °, tj. má kapacitní charakter a s rostoucí frekvencí se zvětšuje. Experimentem bylo dokázáno, že polyelektrolytový senzor může být vnímán jako kapacitní i odporový senzor vlhkosti v závislosti na frekvenčním rozsahu, ve kterém pracuje. Štítek vykazuje zřetelný frekvenční posun o 80 kHz mezi suchým stavem (relativní vlhkosti 10 %) a vysokou vlhkostí (90 %). Rezonanční frekvence se stále zvyšuje s rostoucí vlhkostí, což činí tento senzor dobrým kandidátem pro bezdrátové měření vlhkosti [33].

## 6.5 Tištěný senzor vlhkosti na plastovém substrátu

Tištěná elektronika má vysoký potenciál v potravinářském průmyslu, konkrétně ve sledování kvality přepravovaných potravin podléhajícím rychlé zkáze. V dnešní době je

možné uvažovat o nových aplikacích souvisejících s inteligentním obalem zboží, které využívají právě tištěnou elektroniku, převážně díky potenciálně nízkým nákladům na plochu povrchu, díky její mechanické pružnosti a možnosti zpracování ve velkém množství. Důležitou součástí těchto tištěných senzorů je schopnost určitých polymerů absorbovat vlhkost a jiné plyny, což zapříčiní změnu jejich dielektrických vlastností. Návrh senzoru, popisovaný v této kapitole, je založen na interdigitálních elektrodách, které umožňují velice nízkou spotřebu energie. Jejich výhodou, oproti klasickým elektrodám, je schopnost vytvářet elektrické pole jak v dielektrických vrstvách pod, tak i na povrchu elektrod. Proces výroby zahrnuje pouze aditivní kroky, inkoustový tisk a elektrolytické pokovování, čímž se minimalizuje vzniklý odpad.

Snímací vrstva, která je umístěna na povrchu elektrod, je tvořena polymerem, schopným vstřebávat plyn – v tomto případě vodní páru. Výsledkem je zvětšování tloušťky vrstvy a změna její dielektrické konstanty  $\varepsilon$ , čímž se mění i hodnota kapacity  $C$ . Čím silnější je snímací vrstva, tím více molekul může vstřebat, což umožní větší změny kapacity, a tím pádem vede k větší citlivosti senzoru. Silnější vrstva však také znamená pomalejší stabilizaci senzoru, a tak je třeba nalézt kompromis mezi dobou odezvy senzoru a citlivostí. V substrátu byly použity pružné PET (polyethylentereftalátové) fólie, na které byly pomocí stříbrného inkoustu na bázi nanočástic (typ inkoustu DGP 40LT-15C) nanášeny elektrody. Po vytvrzení v peci při 150 °C byl prototyp podroben elektrolytickému procesu v niklové lázni. Pro vytvoření vrstvy citlivé na vlhkost byl použit roztok acetát-butyrátu celulózy (CAB), který je dobře známý pro svoji citlivost na vlhkost a snadné zpracování. Nakonec byl tento CAB inkoust natištěn na elektrody. Senzor se testoval při pokojové teplotě v měřicí komoře, která umožňovala automatické řízení proudění mokrého a suchého vzduchu. Pro měření odpovídajících kapacitních hodnot při frekvenci 100 kHz po 5 sekundách byly použity dva LCR metry. Naměřené hodnoty kapacity a času byly monitorovány a zaznamenávány přes počítač ve stejné chvíli, kdy byla pomocí komerčního senzoru měřena teplota a relativní vlhkost (měřilo se v rozsahu relativní vlhkosti od 10 % do 70 %). Problémem při měření byl fakt, že v každém časovém kroku, kdy se měnila relativní vlhkost, dosáhla pouze horní vrstva substrátu rovnováhy s vnějším prostředím, což bylo zapříčiněno příliš velkou tloušťkou (125  $\mu\text{m}$ ). K odstranění tohoto parazitního jevu se provedl druhý experiment, používající senzor, který nebyl elektrolyticky pokovován vrstvou niklu. Výsledkem byla uspokojivá stabilita pro nízké hodnoty relativní vlhkosti, avšak při vyšších stupních relativní vlhkosti docházelo

k nestabilitě. Výsledná citlivost činí  $0,86 \pm 0,07$  fF na 1 % RH pro nepokovované elektrody a  $1,5 \pm 0,3$  fF na 1 % RH pro 1  $\mu\text{m}$  tlusté elektrody z niklu. Nejistota měření je 5 %. Nakonec byl proveden test s vrstvou niklu o tloušťce 5  $\mu\text{m}$ , která ukázala nejlepší výsledky v porovnání s běžným komerčním senzorem. Odezva senzoru vykazovala vysoký stupeň stability v čase, dosažená citlivost byla  $2,36 \pm 0,08$  fF na 1 % RH, s nejistotou 5 %. Výsledná hodnota časové odezvy senzoru je rovna  $24 \pm 3$  s [34].

## 6.6 Senzor na bázi tetrafluorethylenu tištěný na textilií

Textilní průmysl se v posledních letech stále více zaměřuje na výzkum nových funkčních textilních materiálů (např. kombinace textilií a elektroniky, tzv. „chytré“ (smart) textilie). Většinou se snímače vyrábějí na polyamidových fóliích a poté jsou tkané do textilu. Jinou alternativou je přímý tisk senzoru na textilie.

V tetrafluorethylenovém senzoru byly všechny vodivé prvky senzoru (interdigitální elektrody, spojovací stopy a kontaktní podložky) vytištěny pomocí inkoustové tiskárny (s inkoustem ze stříbrných nanočástic – typ U5603 od firmy SunChemical). Díky možnosti nastavení vysokého rozlišení tisku (průměr jedné kapky asi 50  $\mu\text{m}$ ) byla zaručena kontinuita otiskovaných stop a odpovídající nízký odpor sensorových elektrod (50 – 150  $\Omega$ ). Sorpční vrstva byla nanášena mikropipetovacím zařízením s použitím roztoku sulfonovaného tetrafluorethylenu. Byly vytištěny dva vzorky pro následné testování, přičemž jeden o rozměrech 400  $\mu\text{m}$  x 400  $\mu\text{m}$  a druhý 250  $\mu\text{m}$  x 250  $\mu\text{m}$ . Pro zjištění elektrických parametrů senzoru byla sestavena měřicí konstrukce, která se skládala z generátoru plynové vlhkosti, impedančního analyzátoru, referenčního vlhkoměru a teplotně stabilizované měřicí hlavy. Senzory byly testovány v prostředí při teplotě 25 °C a rozsahu relativní vlhkosti od 5 % do 95 %. Výsledky ukázaly, že druhý snímač při frekvenci měření 1 kHz může měřit změny vlhkosti, které jsou vyšší než 50 % RH, zatímco první senzor je schopen měřit změny vyšší než 65 % RH. Stabilita obou senzorů je téměř totožná. Tento typ senzoru se ukázal jako vhodným kandidátem pro použití nejen v metrologických aplikacích, ale i pro smart textilie, jako jsou např. lékařské košile či ponožky [35].

## 7 Využitelnost trendů v běžné praxi

Pokroky v oblasti sensorové technologie v poslední době vyústily v uvedení na trh mnoho typů senzorů vlhkosti, které mohou být využity v široké škále aplikací. V posledním dvacetiletí byly vyvinuty různé metody snímání, které zaznamenávají relativní vlhkost např. z hlediska hodnoty odporu, kapacity nebo indexu lomu světla. Měření vlhkosti je důležité především pro zlepšení kvality života a při optimalizaci průmyslových procesů.

Nejčastěji využívanými principy pro snímání vlhkosti jsou měření změny kapacity dielektrického materiálu, nebo změny odporu vodivého materiálu v závislosti na relativní vlhkosti. Při měření vlhkosti záleží nejen na použití správné metody, ale také správného materiálu. Ne každý materiál je vhodný pro měření vlhkosti v daném prostředí, a proto je potřebné vždy zvolit správný typ senzoru. Materiály, používané pro měření vlhkosti, jsou většinou organické polymery a odporové polyelektrolyty. Polymerní senzory mají výhodu v jednoduché struktuře a nízkých nákladech, avšak jejich nevýhodou je schopnost měřit pouze v omezeném rozsahu hodnot vlhkosti. Kapacitní typy senzorů jsou limitovány vzdáleností. Odporové senzory, pokud jsou vystaveny chemickým parám a ostatním kontaminantům, ztrácejí dlouhodobou stabilitu. Po expozici kontaminanty může nastat ztráta citlivosti nebo může dojít k úplnému selhání senzoru. Výhodou optických senzorů, využívajících optická vlákna, je široké pásmo měření, což umožňuje měřit na velké vzdálenosti. Tyto senzory jsou odolné vůči elektromagnetickému rušení a vykazují dobré vlastnosti, jako je např. citlivost.

Jako jedny z neoptimálnějších materiálů pro měření vlhkosti se zatím jeví oxidy kovů, jelikož senzory na této bázi mají rychlou dobu odezvy, dobrou stabilitu a opakovatelnost. Keramické senzory vlhkosti založené na porézních oxidech kovů, jako je  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$  a  $\text{WO}_3$ , jsou široce používány, protože tyto materiály vykazují poměrně vysokou chemickou, mechanickou a tepelnou stabilitu. Příklady aplikací měření vlhkosti v praxi jsou uvedeny na obrázku 23.





Obrázek 23: Příklady aplikace senzorů vlhkosti v praxi

Monitorování vlhkosti při výstavbě budov, silnic nebo mostů může zabránit velkým škodám, které mohou být způsobeny pórovitou strukturou betonu. Senzory vlhkosti mohou umožnit, aby byla přijata vhodná opatření, a tím prokázána úspora nákladů.

Monitorování množství vlhkosti při zpracování potravin je důležité z hlediska jejich převozu a uchovávání. Např. ovoce a zelenina se uchovávají v prostředí s vlhkostí pod 90 % RH, zároveň však velmi vlhké prostředí poskytuje přirozené podmínky pro různé plísňové infekce. Měření vlhkosti v takovém prostředí je poté zásadní, jelikož dává spotřebitelům představu o biologické aktivitě produktu.

Využití měření vlhkosti v medicínské oblasti se týká především problémů s dýchacími cestami, které jsou závislé na kvalitě okolního vzduchu. Dále např. pro magnetickou rezonanci (MRI) jsou přímo doporučovány optické vlhkostní senzory, jelikož senzory na jiné bázi by mohly být ovlivněny radiací nebo elektrickým či magnetickým polem.

V posledních letech se stále více využívá biomasa jako náhrada fosilních paliv a je důležité snímat vlhkost paliva, jelikož může dojít k nejistotě v jejím energetickém obsahu při dodávání do závodu.

Posledním příkladem aplikace senzorů vlhkosti v běžné praxi je zajištění lidského komfortu. Množství vodní páry ve vzduchu je pro člověka významné hlavně z hlediska hygienických podmínek, především v uzavřených místnostech, kde hodnota relativní vlhkosti určuje nejen pocitové podmínky, ale také ovlivňuje stavební parametry celé budovy [36].

## 8 Závěr

Práce se skládá z pěti hlavních částí. První část jsem věnovala teoretickému úvodu. Druhou část jsem zaměřila na metody měření relativní vlhkosti, které jsou používány v dnešní době, a ve třetí části jsem uvedla příklady běžně používaných přístrojů při laboratorním měření relativní vlhkosti. Ve čtvrté části jsem představila nejnovější trendy v oblasti technologie výroby senzorů relativní vlhkosti, konkrétně jsem v práci popsala senzor vlhkosti na bázi optických vláken, využívající Fabry-Perotův interferometr, senzor vlhkosti na bázi organických materiálů a tištěné senzory vlhkosti. V poslední části jsem zhodnotila využitelnost trendů měření relativní vlhkosti v běžné praxi.

Snímače vlhkosti v poslední době získávají značnou pozornost díky své užitečnosti v různých oblastech, jako je zemědělství, průmyslová, potravinářská a stavební výroba, environmentální vědy, lékařství a v dalších oborech. Optimální senzor vlhkosti by měl mít vysokou citlivost na velkém rozsahu relativní vlhkosti, dlouhodobou životnost, krátkou dobu odezvy, nízké výrobní náklady, lineární odezvu, provoz v širokém rozsahu vlhkosti a teplot, měl by být odolný vůči kontaminantům a lehce vyrobitelný. Je proto nutné najít vhodný materiál, který bude mít co nejméně omezení u výše jmenovaných parametrů a rovněž je zapotřebí tento materiál sloučit s použitou technologií, což není jednoduchý úkol. Vyvinutí ideálního materiálu pro měření vlhkosti je možné buď objevením zcela nového materiálu, anebo zlepšením určitých vlastností existujících materiálů. Zatím však nebyl vyvinut žádný senzor, který by splnil všechny požadavky, zejména pokrytí celého rozsahu měření vlhkosti.

V budoucnu se pravděpodobně bude upínat pozornost na vyvíjení nových kompozitů s jedinečnou citlivostí na vlhkost a s vybranými vlastnostmi. Bude pokračovat výzkum zabývající se využitím senzorů na bázi nanostruktury, který by mohl přinést pokrok v oblasti senzorů vlhkosti. Velký potenciál představují tištěné senzory vlhkosti, které mají mezi senzory uvedenými v mojí práci nejlepší požadované vlastnosti. Jejich velkou výhodou je schopnost měřit relativní vlhkost v širokém rozsahu hodnot. Senzory vlhkosti na bázi organických materiálů mají velmi rychlé doby odezvy, resp. zotavení a dobrou stabilitu, avšak jsou limitovány schopností měřit v širokém rozsahu hodnot relativní vlhkosti.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] WEBSTER, John G. *The Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*. CRC Press, 1999. ISBN 978-0849383472.
- [2] WERNECKE, Roland a WERNECKE, Jan. *Industrial Moisture and Humidity Measurement: A Practical Guide* [online]. John Wiley & Sons, 2013. ISBN 978-3-527-65243-3. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=soBnAgAAQBAJ>
- [3] LEBEDOVÁ, Zita. *Zjišťování vlhkosti dřeva váhovou metodou*. SPŠ Stavební Opava, 2014.
- [4] Obrázek [online]. RADWAG Váhy s.r.o. Dostupné z: <https://www.radwag.cz/ma-50-r>
- [5] KRŠKA, Karel. *Assmannův aspirační psychrometr a jeho konstruktér*. Meteorologické zprávy [online]. Brno, 2007, (60), 194-197. Dostupné z: [http://www.cmes.cz/sites/default/files/MZ\\_2007\\_6\\_assman.pdf](http://www.cmes.cz/sites/default/files/MZ_2007_6_assman.pdf)
- [6] Obrázek [online]. HELAGO-CZ s. r. o. Dostupné z: <https://www.helago-cz.cz/>
- [7] Měření relativní vlhkosti. In: Katedra materiálového inženýrství a chemie, fakulta stavební ČVUT v Praze. [online]. Dostupné z: <http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/TVVM/TVVM6.pdf>
- [8] Obrázek. [online]. MeteoPlus. Dostupné z: <https://sklep.meteoplus.pl/p/449/2140/lambrecht-761-psychrometr-assmanna-aspirowany-profesjonalny-tradycyjny-dydaktyczny-wilgotnosc-powietrza-tradycyjne-manualne-sprzet-profesjonalny.html>
- [9] MAREŠ, Luděk. *Vlhkost vzduchu a její měření*. TZB-info - stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov [online]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/teorie-a-vypocty-vetrani-klimatizace/3137-vlhkost-vzduchu-a-jeji-mereni>
- [10] HANZAL, Josef. *Vlhkoměry*. Vývoj.HW.cz - Vše o elektronice a programování [online]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/vlhkomery.html-0>
- [11] *Profesionální měřicí přístroje a systémy od světového leadera na trhu Testo SE & Co*. [online]. Dostupné z: <https://www.testo.com>

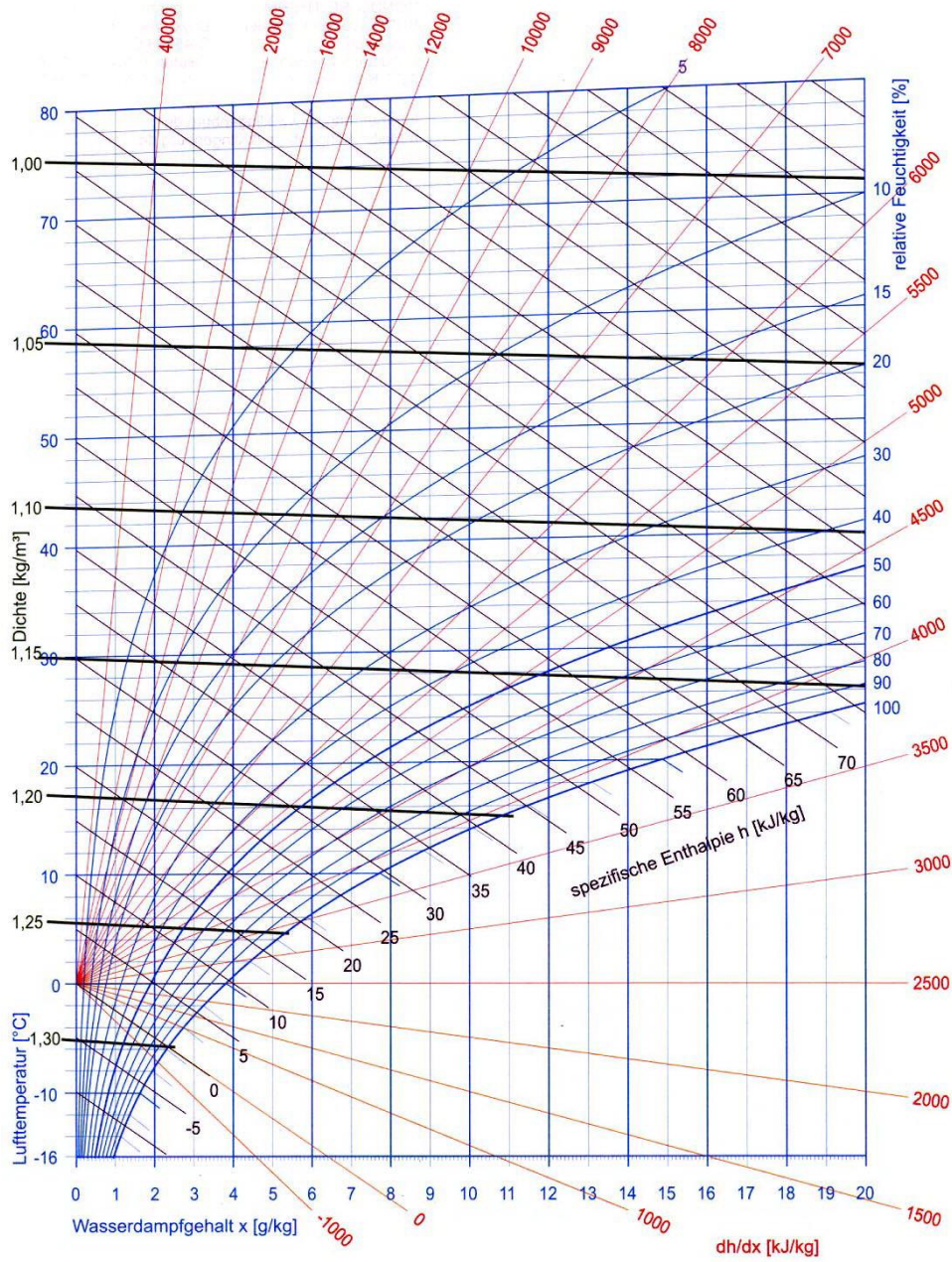
- [12] MULLIGAN, Joseph F. *Who were Fabry and Perot?* American Journal of Physics. [online] 22. 1. 1998, 66(9), 797-802.  
Dostupné z: <https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.18960>
- [13] VAUGHAN, J. M. *The Fabry-Perot Interferometer: History, Theory, Practice and Applications*. New York: Taylor & Francis Group, 1989. ISBN 0-85274-138-3.
- [14] Encyklopedie Wikipedie: *Interference světla* [online]. Aktualizováno: 21. 10. 2017.  
Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Interference#Interference\\_světla](https://cs.wikipedia.org/wiki/Interference#Interference_světla)
- [15] Encyklopedie Wikipedie: *Fabry-Perot interferometer*. [online]. Aktualizováno: 1. 5. 2019. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fabry-Perot\\_interferometer](https://en.wikipedia.org/wiki/Fabry-Perot_interferometer)
- [16] Polymer Solutions News Team: *Chitosan: A Natural and Amazing Polymer*. Polymer Solutions Incorporated [online]. 7.11.2013. Dostupné z: <https://www.polymersolutions.com/blog/chitosan-a-natural-and-amazing-polymer>
- [17] CHEN, L.H., Li T., Chan C.C., Menon R., Balamurali P., Shailender M., Neu B., Ang X.M., Zu P., Wong W.C., Leong K.C. *Chitosan based fiber-optic Fabry-Perot humidity sensor*. Sensors and Actuators B: Chemical [online]. 27.4.2012, (169), 167-172.  
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400512004121>
- [18] YOO Kum-Pyo, Lim Lee-Taek, Min Nam-Ki, Lee Myung Jin, Lee Chul Jin, Park Chan-Won. *Novel resistive-type humidity sensor based on multiwall carbon nanotube/polyimide composite films*. Sensors and Actuators B: Chemical. [online] 2009. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092540050900906X>
- [19] ACS Material: Advanced Chemicals Supplier. *Graphene Oxide*. [online] 2017.  
Dostupné z: <https://www.acsmaterial.com/blog/index/view/id/14/>
- [20] BI, Hengchang, Yin Kuibo, Xia Xiao, Ji Jing, Wan Shu, Sun Litao, Terrones Mauricio, Dresselhaus Mildrer S. *Ultrahigh humidity sensitivity of graphene oxide*. *Scientific Reports*. [online]. 2013.  
Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/srep02714>
- [21] CHEN Wei-Ping, Zhao Zhen-Gang, Liu Xiao-Wei, Zhang Zhong-Xin, Suo Chun-Guang. *A capacitive humidity sensor based on multi-wall carbon nanotubes*. *Sensors*. [online] 2009.  
Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3290510/>

- [22] CHANI Muhammad Tariq Saeed, Karimov Kh. S, Khalid Ahmad F., Raza Kabeer, Farooq Muhammad Umer, Zafar Qayyum. *Humidity sensors based on aluminum phthalocyanine chloride thin films*. Physica E. [online] (45), 2012. 77-81.  
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1386947712002767>
- [23] PARK Jin-Kwan, Kang Tae-Gyu, Kim Byung-Hyun, Lee Hee-Jo, Choi Hyang Hee, Yook Jong-Gwan. *Real-time Humidity Sensor Based on Microwave Resonator Coupled with PEDOT:PSS Conducting Polymer Film*. Scientific Reports. [online] 2018. Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/s41598-017-18979-3>
- [24] MAHADEVA, Suresha K., Yun Sungryul, Kim Jaehwan. *Flexible humidity and temperature sensor based on cellulose-polypyrrole nanocomposite*. Sensors and Actuators A: Physical. [online] 2010.  
Dostupné z:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924424710004760>
- [25] Encyklopedie Wikipedie: *Sol-gel*. [online]  
Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Sol-gel>
- [26] YUAN, Qing, Li Nan, Tu Jinchun, Li Xiaotian, Wang Rui, Zhang Tong, Shao Changlu. *Preparation and humidity sensitive property of mesoporous ZnO-SiO<sub>2</sub> composite*. Sensors and Actuators B: Chemical. [online] 2010.  
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400510005277>
- [27] LIN, Wang-De, Liao Chih-Ting, Chang Tsan-Chang, Chen Su-Hua, Wu Ren-Jang. *Humidity sensing properties of novel graphene/TiO<sub>2</sub> composites by sol-gel process*. Sensors and Actuators B: Chemical. [online] 2014.  
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092540051401555X>
- [28] STOUKATCH ,S., Laurent P., Dricot S., Axisa F., Seronveaux L., Vandormael D., Beeckman E., Heusdens B., Destiné J. *Evaluation of Aerosol Jet Printing (AJP) technology for electronic packaging and interconnect technique*. 2012 4th Electronic System-Integration Technology Conference.  
Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6542067>
- [29] REDDY, A.S.G., Narakathu, B.B., Atashbar, M.Z., Rebros M., Rebrosova E., Joyce M.K.. *Fully Printed Flexible Humidity Sensor*. Procedia Engineering. [online] 2011, (25), 120-123.  
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811056992>
- [30] Encyklopedie Wikipedie: *Ultra high frequency*. [online] Aktualizováno: 24. 3. 2019. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ultra\\_high\\_frequency](https://en.wikipedia.org/wiki/Ultra_high_frequency)

- [31] VIRTANEN, Juha, Ukkonen, Leena, Björninen, Toni, Elsherbeni, Atef Z., Sydänheimo, Lauri. *Inkjet-Printed Humidity Sensor for Passive UHF RFID Systems*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. [online] 2011, (8), 2768-2777. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5759086>
- [32] *DP Patterning: Technology* [online]. Švédsko, 2018. Dostupné z: <https://dppatterning.com/tech/technology/>
- [33] WANG, Xiaodong, Larsson, Oscar, Platt, Duncan, Nordlinder, Staffan, Enquist, Isak, Berggren, Magnus, Crispin, Xavier. *An all-printed wireless humidity sensor label*. Sensors and Actuators B: Chemical. [online] 2012, (166-167), 556-561. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400512002602>
- [34] MOLINA-LOPEZ, F., Briand D., De Rooij N.F.: *All additive inkjet printed humidity sensors on plastic substrate*. Sensors and Actuators B: Chemical. [online] 2012, (166-167), 212-222. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400512001748>
- [35] WEREMCZUK, Jerzy, Tarapata, Grzegorz, Jachowicz, Ryszard: *Humidity sensor printed on textile with use of ink-jet technology*. Procedia Engineering. [online] 2012, (47), 1366-1369. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705812044736>
- [36] SIKARWAR, S., Yadav B.C. *Opto-electronic humidity sensor: A review*. Sensors and Actuators A: Physical. [online] 2015. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924424715300030>

## Přílohy

## Příloha A – Mollierův diagram

Mollier-h,x-Diagramm für feuchte Luft für  $p = 1$  bar



## Příloha B – Psychrometrická tabulka pro teploty od 18 °C do 25 °C

t [°C]	Rozdíl teplot $t - t_m$ [°C]																					
	0,0	0,2	0,4	1,0	1,4	2,0	2,4	3,0	3,4	4,0	4,4	5,0	5,4	6,0	6,4	7,0	7,4	8,0	8,4	9,0	9,4	10,0
+18,0	100	98	96	91	87	82	78	73	70	65	61	56	53	49	46	41	38	34	31	27	24	20
18,2	100	98	96	91	87	82	78	73	70	65	61	57	54	49	46	41	38	34	31	27	24	20
18,4	100	98	96	91	87	82	79	73	70	65	62	57	54	49	46	42	39	34	32	27	25	21
18,6	100	98	96	91	87	82	79	73	70	65	62	57	54	49	46	42	39	35	32	28	25	21
18,8	100	98	96	91	87	82	79	74	70	65	62	57	54	50	47	42	39	35	32	28	25	21
19,0	100	98	96	91	87	82	79	74	70	66	62	58	55	50	47	43	40	36	33	29	26	22
19,2	100	98	96	91	87	82	79	74	71	66	63	58	55	50	47	43	40	36	33	29	26	22
19,4	100	98	96	91	87	82	79	74	71	66	63	58	55	51	48	43	40	36	33	29	27	23
19,6	100	98	96	91	88	82	79	74	71	66	63	58	55	51	48	44	41	37	34	30	27	23
19,8	100	98	96	91	88	83	79	74	71	66	63	59	56	51	48	44	41	37	34	30	28	24
20,0	100	98	96	91	88	83	79	74	71	66	63	59	56	51	48	44	41	37	35	30	28	24
20,2	100	98	97	91	88	83	79	75	71	67	64	59	56	52	49	44	42	38	35	31	28	24
20,4	100	98	96	91	88	83	80	75	71	67	64	59	56	52	49	45	42	38	35	31	29	25
20,6	100	98	96	91	88	83	80	75	72	67	64	59	56	52	49	45	42	38	36	32	29	25
20,8	100	98	97	91	88	83	80	75	72	67	64	60	57	52	50	45	43	39	36	32	29	26
21,0	100	98	97	91	88	83	80	75	72	67	64	60	57	53	50	46	43	39	36	32	30	26
21,2	100	98	97	92	88	83	80	75	72	67	64	60	57	53	50	46	43	39	37	33	30	26
21,4	100	98	97	91	88	83	80	75	72	68	65	60	57	53	50	46	43	39	37	33	30	27
21,6	100	98	97	92	88	83	80	75	72	68	65	60	58	53	50	46	44	40	37	33	31	27
21,8	100	98	97	92	88	83	80	76	72	68	65	61	58	54	51	47	44	40	37	34	31	28
22,0	100	98	97	92	88	84	80	76	73	68	65	61	58	54	51	47	44	40	38	34	32	28
22,2	100	98	97	92	88	83	80	76	73	68	65	61	58	54	51	47	45	41	38	34	32	28
22,4	100	98	97	92	88	84	80	76	73	68	65	61	58	54	51	47	45	41	38	35	32	29
22,6	100	98	97	92	88	84	80	76	73	69	66	61	59	54	52	48	45	41	39	35	33	29
22,8	100	98	97	92	88	84	81	76	73	69	66	62	59	55	52	48	45	42	39	35	33	29
23,0	100	98	97	92	88	84	81	76	73	69	66	62	59	55	52	48	46	42	39	36	33	30
23,2	100	98	97	92	89	84	80	76	73	69	66	62	59	55	52	48	46	42	40	36	33	30
23,4	100	98	97	92	89	84	81	76	73	69	66	62	59	55	53	49	46	42	40	36	34	30
23,6	100	98	97	92	89	84	81	76	74	69	66	62	59	55	53	49	46	43	40	37	34	31
23,8	100	98	97	92	89	84	81	77	74	69	67	62	60	56	53	49	47	43	40	37	34	31
24,0	100	98	97	92	89	84	81	77	74	70	67	63	60	56	53	49	47	43	41	37	35	31
24,2	100	98	97	92	89	84	81	77	74	70	67	63	60	56	53	49	47	43	41	37	35	31
24,4	100	98	97	92	89	84	81	77	74	69	67	63	60	56	53	50	47	44	41	37	35	32
24,6	100	98	97	92	89	84	81	77	74	70	67	63	60	56	54	50	47	44	41	38	36	32
24,8	100	98	97	92	89	84	81	77	74	70	67	63	60	56	54	50	48	44	41	38	36	32
25,0	100	98	97	92	89	84	81	77	74	70	67	63	61	57	54	50	48	44	42	38	36	33