

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

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

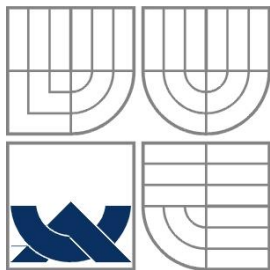
HODNOCENÍ PAROPROPUSTNOSTI MATERIÁLŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

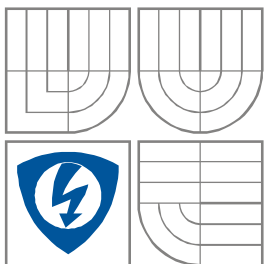
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR ZEMÁNEK

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

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

HODNOCENÍ PAROPROPUSTNOSTI MATERIÁLŮ EVALUATION OF WATER VAPOR PERMEABILITY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

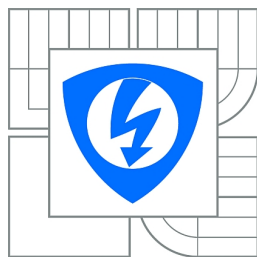
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR ZEMÁNEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MARTIN FRK, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Petr Zemánek

ID: 147660

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Hodnocení paropropustnosti materiálů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s odbornou terminologií a fyzikálními zákonitostmi souvisejícími s propustností vodních par materiály. Prostudujte příslušné normy a sumarizujte základní požadavky kladené na paropropustnost materiálů v nejrůznějších průmyslových aplikacích a zpracujte přehled diagnostických metod používaných pro hodnocení jejich vlastností.

Sestavte automatizované laboratorní pracoviště využívající jednu z možných metodik měření a na vybraných vzorcích materiálů proveďte zkoušku hodnocení paropropustnosti s příslušným vyhodnocením a se vzájemným porovnáním jednotlivých materiálů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího bakalářské práce.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 5.6.2014

Vedoucí práce: Ing. Martin Frk, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tématem této práce je seznámení se s odbornou terminologií a fyzikálními zákonitostmi paropropustnosti materiálů v různých průmyslových odvětvích. Jsou zde popsány základní vlastnosti propustnosti vodních par a jejich význam. Dále jsou zmíněny možnosti měření paropropustnosti v jednotlivých oblastech využití. Praktická část zahrnuje měření a vyhodnocení propustnosti vodních par na vybraných vzorcích.

KLÍČOVÁ SLOVA: paropropustnost, difúze, RADWAG MAX, výparný odpor

ABSTRACT

The theme of this work is the knowledge of technical terminology and the laws of physics permeability materials in various industries. There are described basic properties of water vapor permeability and their meaning. This work refers to the possibility of measuring permeability in different application areas. The practical part involves the measurement and evaluation of water vapor transmission on selected samples.

KEY WORDS: water vapor permeability, diffusion, RADWAG MAX, evaporative resistance

Bibliografická citace

ZEMÁNEK, P. *Hodnocení paropropustnosti materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 31 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Frk, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma „**Hodnocení paropropustnosti materiálů**“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 5. června 2014

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Frkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování práce.

V Brně dne 5. června 2014

.....

podpis autora

Obsah

Úvod.....	7
Teoretická část.....	8
1. Textilní průmysl	8
1.1. Měření pomocí přístroje PERMETEST	8
1.2. Relativní propustnost vodních par	10
1.3. Výparný odpor	10
1.4. Tepelný odpor	10
2. Stavební průmysl.....	12
2.1. Hustota ustáleného difúzního toku.....	12
2.2. Difúzní vodivost a faktor difúzního odporu.....	12
2.3. Ekvivalentní difúzní tloušťka.....	13
2.4. Roční bilance kondenzace a vypařování vodní páry uvnitř konstrukce	13
3. Potravinářský průmysl.....	14
3.1. Propustnost.....	14
3.2. Koeficient propustnosti.....	15
3.3. Difúze	15
4. Sušicí váhy - analyzátor vlhkosti Radwag MAX 60	17
4.1. Set pro měření propustnosti vodních par	17
Praktická část.....	19
5. Měření na analyzátoru vlhkosti Radwag MAX 60.....	19
5.1. Popis analyzátoru Radwag MAX 60.....	19
5.2. Princip měření paropropustnosti	19
5.3. Podmínky měření	20
5.4. Postup měření – nulový test.....	20
5.5. Postup měření - s materiálem.....	21

6. Testované vzorky	23
7. Výsledky.....	24
8. Vyhodnocení a diskuze	25
Závěr.....	26
Seznam použité literatury.....	27
Seznam obrázků	29
Seznam rovnic	30
Seznam tabulek	31

Úvod

Paropropustnost je schopnost látky umožňující vodním parám přechod skrz materiál. Nejčastěji se s paropropustností můžeme setkat v textilním průmyslu, ve stavebnictví a potravinářském průmyslu. Ve většině případů se jedná spíše o nežádoucí jev způsobený vnějšími vlivy. V textilním odvětví lze paropropustnost definovat jako měřítko pro prodyšnost nebo schopnost textilu k přenosu vlhkosti. Ve stavebnictví se obvykle hovoří o difúzi, která úzce souvisí s paropropustností. V potravinářství se s propustností vodních par můžeme setkat u obalových materiálů.

Teoretická část

1. Textilní průmysl

V dnešní době je velký výběr textilních výrobků. Každý výrobek má své vlastnosti, ale ty hlavní mají všechny společné. Jedná se především o vlastnosti jako je např. odolnost v oděru, omak, tepelně izolační vlastnosti, ale také estetické vlastnosti, vzor, materiál aj. S materiálem souvisí také propustnost vodních par. Ačkoliv si to každý hned při koupi nového výrobku neuvědomí, paropropustnost materiálu je jeden z hlavních důvodů, který udává pocit pohodlí či nepohodlí při využívání daného výrobku. Lidi zajímá spíše trvanlivost výrobku nebo odolnost proti opotřebení, ale pokud se v zakoupeném výrobku necítí dobře, bude jim jedno, jak dlouho výrobek vydrží. Z tohoto důvodu je termofyziologický komfort projevující se při pohybu a větší fyzické námaze člověka stejně důležitý jako již zmíněná trvanlivost a odolnost výrobku a tudíž by se na propustnost vodních par materiálem mělo více upozorňovat.[1]

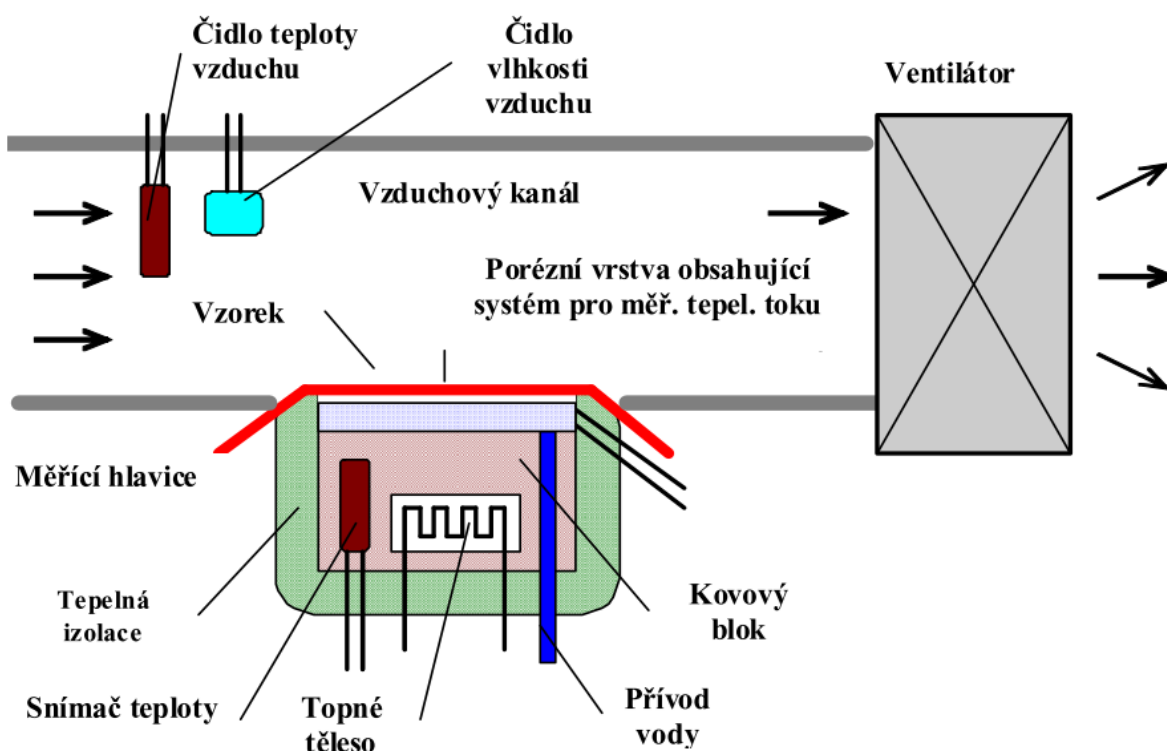
V textilním průmyslu se na zjištění propustnosti vodních par používá metoda měření pomocí přístroje PERMETEST.[1]

1.1. Měření pomocí přístroje PERMETEST



Obrázek 1 - měřicí přístroj PERMETEST [2]

Jedná se o malý přístroj měřící na bázi skin modelu. V roce 1990 byl patentován profesorem Lubošem Hesem z Technické univerzity v Liberci. Přístroj měří bez mechanického poškození materiálu tepelný odpor, výparný odpor a relativní propustnost vodních par během pár minut (cca 5 minut). Před měřením musí být přístroj zkalibrován příslušnou kalibrační textilií. Podstatou PERMETESTu je měření tepelného toku procházejícího povrchem modelu lidské pokožky. Tento model (měřicí hlavice) je zvlhčován, porézní a překrytý separační fólií, zabraňující styku s vodou. Na povrch hlavice je přiložen vzorek, jehož vnější strana je vystavena proudění vzduchu. Hlavice je zahřívána na teplotu okolního vzduchu, který je do přístroje nasáván. Uvnitř přístroje jsou zajištěny stále stejné podmínky. Vlhkost v porézní vrstvě se při měření mění v páru, která projde přes separační fólii. Speciálním snímačem zaznamenáváme výparný tepelný tok, jehož hodnota je nepřímo úměrná výparnému odporu a přímo úměrná paropropustnosti daného vzorku. Při měření se nejdříve změří tzv. referenční vrstva (bez vzorku) a až poté probíhá měření daného vzorku. [1,2,3]



Obrázek 2 – schéma přístroje PERMETEST [1]

1.2. Relativní propustnost vodních par

Relativní propustnost vodní páry p [%] udává poměr tepelného toku q_0 , odpařeného z vodní hladiny o stejném průměru jako je měřený vzorek, a tepelného toku q_v po zakrytí hladiny vzorkem. Jedná se o nenormalizovaný parametr, kde 100% propustnost představuje tepelný tok q_0 .

$$p = 100 \times \left(\frac{q_v}{q_0} \right) \text{ [%]}$$

Rovnice 1 - relativní propustnost pro vodní páry

- kde q_v ... plošná hustota tepelného toku procházející měřicí hlavicí nezakrytou měřeným vzorkem [W/m^2]
 q_0 ... plošná hustota tepelného toku procházející měřicí hlavicí zakrytou měřeným vzorkem [W/m^2]
 p ... relativní propustnost pro vodní páry [%] [1]

1.3. Výparný odpor

Výparný odpor hraje velkou roli při ochlazování těla odpařováním potu z pokožky. Hodnota výparného odporu se stanoví:

$$R_{et} = (P_m - P_a) \times (q_v^{-1} q_0^{-1}) \text{ [m}^2 \cdot \text{Pa/W]}$$

Rovnice 2 - výparný odpor

- kde R_{et} ... výparný odpor zkoušeného vzorku [$\text{m}^2 \cdot \text{Pa/W}$]
 P_m ... nasycený parciální tlak vodní páry na povrchu měřicí hlavy [Pa]
 P_a ... parciální tlak vodní páry ve vzduchu ve zkušebním prostoru při teplotě vzduchu ve zkušebním prostoru [Pa]

Hodnocení propustnosti vodních par materiály pomocí výparného odporu R_{et} dle normy ISO 11092 je dnes nejčastěji používanou metodou. Čím je nižší hodnota výparného odporu, tím má materiál vyšší paropropustnost. [4]

1.4. Tepelný odpor

Tepelný odpor R_{ct} vyjadřuje odpor proti prostupu tepla vzorkem. Je dán rozdílem teploty t_m , z jedné strany vzorku a teploty vzduchu t_a z druhé strany vzorku. Stanovená hodnota tepelného odporu pro textilie však není přesná z důvodu drsného nebo hrubého povrchu materiálu. Tento postup se i přesto v Evropě používá a stanovení tepelného odporu je dáno normou ISO 11092 dle vzorce:

$$R_{ct} = (t_m - t_a) (q_v^{-1} - q_0^{-1}) [\text{m}^2 \cdot \text{K/W}]$$

Rovnice 3 - tepelný odpor

kde $t_m \dots$ je teplota povrchu měřicí hlavice [$^{\circ}\text{C}$]

$t_a \dots$ je teplota vzduchu proudícího kanálem podél měřicí hlavice [$^{\circ}\text{C}$] [1]

2. Stavební průmysl

Ve stavebním průmyslu dochází k propustnosti vodních par převážně ve střešních konstrukcích a omítkách. Podmínkou paropropustnosti je zde předpoklad, že konstrukce odděluje dvě prostředí s různými tlaky vodní páry. Ve stavebních materiálech dochází k pohybu vlhkosti podle zákonů difúze, a to od místa s větším tlakem k místu s nižším tlakem vodní páry. [5,6]

2.1. Hustota ustáleného difúzního toku

Hustotu ustáleného difúzního toku vodní páry popisuje Fickův zákon, který je analogický k Fourierovu zákonu, který popisuje hustotu tepelného toku vedením. Fickův zákon lze vyjádřit vztahem:

$$g_x = -\delta \frac{p_{s,e} - p_{s,i}}{d} \quad [\text{kg (m}^2\text{.s)}]$$

Rovnice 4 - hustota ustáleného difúzního toku

- kde g_x ... hustota difúzního toku vodní páry [kg (m².s)]
 $p_{s,e}$... částečný tlak vodní páry ve vzduchu na vnějším povrchu konstrukce [Pa]
 $p_{s,i}$... částečný tlak vodní páry ve vzduchu na vnitřním povrchu konstrukce [Pa]
 d ... tloušťka materiálu [m] [5,6]

2.2. Difúzní vodivost a faktor difúzního odporu

Součinitel difúze vodní páry (difúzní vodivost) charakterizuje difúzní schopnost materiálu. Pro difúzní vodivost materiálu δ platí:

$$\delta = \frac{\delta_a}{\mu} \quad [\text{kg (m.s.Pa)}]$$

Rovnice 5 - difúzní vodivost materiálu

- kde δ ... difúzní vodivost [kg (m.s.Pa)]
 δ_a ... difúzní vodivost nehybného vzduchu [kg (m.s.Pa)]
 μ ... faktor difúzního odporu [-]

Součinitel difúze vodní páry byl využíván několik desetiletí, v dnešní době se převážně používá faktor difúzního odporu μ udávající, kolikrát méně je daný materiál propustný pro vodní páru než pro vzduch. Pro vzájemný přepočet těchto jednotek platí vztah:

$$\mu = \frac{1}{\delta \times N} \quad [-]$$

Rovnice 6 - faktor difúzního odporu

kde $N \dots$ teplotně difúzní funkce [s^{-1}] (pro běžné výpočty se užívá konstantní hodnoty
 $N=5,315 \cdot 10(9) s^{-1}$) [5,6]

2.3. Ekvivalentní difúzní tloušťka

Jednou z dalších základních veličin vypovídající o difúzních vlastnostech materiálů ve stavebnictví je ekvivalentní difúzní tloušťka s_d . Tato veličina udává, jakou tloušťku by měla mít vzduchová mezera, aby difúzní odpor zjišťovaného materiálu byl stejný. Ekvivalentní difúzní tloušťku materiálu lze určit ze vztahu:

$$s_d = \mu \times d \quad [m]$$

Rovnice 7 - ekvivalentní difúzní tloušťka

kde $s_d \dots$ ekvivalentní difúzní tloušťka [m]
 $\mu \dots$ faktor difúzního odporu [-]
 $d \dots$ tloušťka materiálu [m] [7,8]

2.4. Roční bilance kondenzace a vypařování vodní páry uvnitř konstrukce

Pokud v konstrukcích dochází ke kondenzaci vodní páry, je nutné provést výpočet roční bilance kondenzace a vypařování vodní páry. Pro výpočet a patřičné náležitosti nám slouží normy ČSN 73 0540 a ČSN EN ISO 13 788. Pokud jsou známy všechny klimatické údaje, doporučuje se používat normu ISO, protože je to novější, modernější a přesnější výpočtová metoda. Výpočet podle ČSN 73 0540 je také akceptovatelný podle platné české normy, ale už nedosahuje takové přesnosti a je považován za jednodušší a klasický. Obě normy stanovují, zda množství zkondenzované vlhkosti v konstrukci za jeden roční cyklus je schopné se zcela vypařit nebo trvale zvyšuje vlhkost uvnitř konstrukce. Roční množství zkondenzované vodní páry uvnitř konstrukce tedy musí být menší než roční množství vypařitelné vodní páry uvnitř konstrukce.[9,10]

3. Potravinářský průmysl

V potravinářském průmyslu se s propustností vodních par setkáváme u obalů. Obal je prostředek splňující převážně ochranné funkce výrobku. V dnešní době již skoro neexistuje výrobek, který by se uchovával bez vnější ochrany. Každý článek ve spotřebitelském řetězci má na obal různé požadavky, které se z části liší a z části shodují. Potravinářské obaly by měly splňovat hygienickou nezávadnost, vhodné mechanické vlastnosti, stabilitu vůči působení potravin i prostředí během zpracování a skladování, vhodný vzhled, nenákladnou likvidaci atd. Z hlediska propustnosti vodních par se zaměříme na základní vlastnosti obalových materiálů, jako je např. propustnost, koeficient propustnosti a difúze. [11,12]

3.1. Propustnost

Permeace nebo-li propustnost udává, kolik vodní páry projde materiálem za 1 den plochou 1m^2 při daném tlaku, přičemž materiál může být složen z několika vrstev. Propustnost a tloušťka materiálu jsou nepřímo úměrné a pro vrstvené materiály, u kterých známe patřičné údaje, můžeme propustnost vypočítat součtem převrácených hodnot. Rychlost prostupu permeantu materiálem je definován vztahem:

$$R = \frac{Q}{A \times t} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Rovnice 8 - rychlost prostupu látky

kde $R \dots$ rychlost prostupu permeantu $[\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$
 $Q \dots$ množství prošlého permeantu za jednotku času $[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
 $A \dots$ plocha $[\text{m}^2]$
 $t \dots$ čas $[\text{s}]$

Výpočet propustnosti vrstvené fólie (čtyřvrstvá fólie):

$$\frac{1}{P_x} = \frac{1}{P_{x_1}} + \frac{1}{P_{x_2}} + \frac{1}{P_{x_3}} + \frac{1}{P_{x_4}}$$

Rovnice 9 - propustnost celé vrstvené fólie

kde $P_x \dots$ propustnost celé fólie
 $P_{x_{1-4}} \dots$ propustnost jednotlivých fólií [13,14]

3.2. Koeficient propustnosti

Množství vodní páry prošlé materiálem o tloušťce 0,1mm za den plochou 1m² nám udává koeficient propustnosti P. Dále charakterizuje ochrannou účinnost obalu proti pronikání vodní páry. Koeficient propustnosti (P) je definován vztahem:

$$P = R \times \frac{L}{\Delta p} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}]$$

Rovnice 10 - koeficient propustnosti

kde P ... permeační koeficient [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$]

L ... tloušťka [cm]

Δp ... tlakový rozdíl [Pa]

s ... rozpustnost plynu nebo par [m^3]

Často se udává koeficient P pro vodní páru v jednotkách:

$$P [\text{g} \cdot 0,1\text{mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 2,37\text{kPa}^{-1}] \quad [13,14]$$

3.3. Difúze

Difúze je děj, při kterém dochází k pohybu molekul z místa o vysoké koncentraci do místa o nízké koncentraci. Vztah mezi rychlostí difúzního toku a koncentračního gradientu je vyjádřen 1. Fickovým zákonem.

1. Fickův zákon - hustota difúzního toku látky je úměrná zápornému gradientu její koncentrace:

$$J = -D \times \frac{\delta c}{\delta x}$$

Rovnice 11 - 1. Fickův zákon

Pro jednosměrnou difúzi platí vztah:

$$\frac{\delta c}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} \times (D \times \frac{\delta c}{\delta x})$$

Rovnice 12 - jednosměrná difúze

konstantním difúzním koeficientu platí vztah:

$$\frac{\delta c}{\delta t} = D \frac{\delta^2 c}{\delta x^2}$$

Rovnice 13 - jednosměrná difúze při konstantním difúzním koeficientu

kde $J \dots$ je difúzní tok roztoku plynů nebo par

$D \dots$ je difúzní koeficient, který je obecně funkcí teploty, tlaku nebo koncentrace

$\delta c \dots$ je gradient koncentrace [mol.m^{-4}]

$\frac{\delta c}{\delta x} \dots$ je gradient koncentrace ve směru x

$c \dots$ je koncentrace

$t \dots$ je čas [13,14]

4. Sušící váhy - analyzátor vlhkosti Radwag MAX 60



Obrázek 3 – sušící váhy Radwag MAX 60 [15]

Sušící váhy Radwag MAX 60 jsou měřicí zařízení navržené pro rychlé stanovení vlhkosti obsažené v malých vzorcích (do 60g) kapalných i pevných materiálů. Vlhký vzorek je měřen s přesností od 0,001%. Minimální sušící teplota je 40°C a maximální 160°C (volitelně až 250°C). Přístroj obsahuje databázi 99 sušících procesů. Snadnou obsluhu usnadňuje grafický displej a 12 tlačítek ovládání. [15]

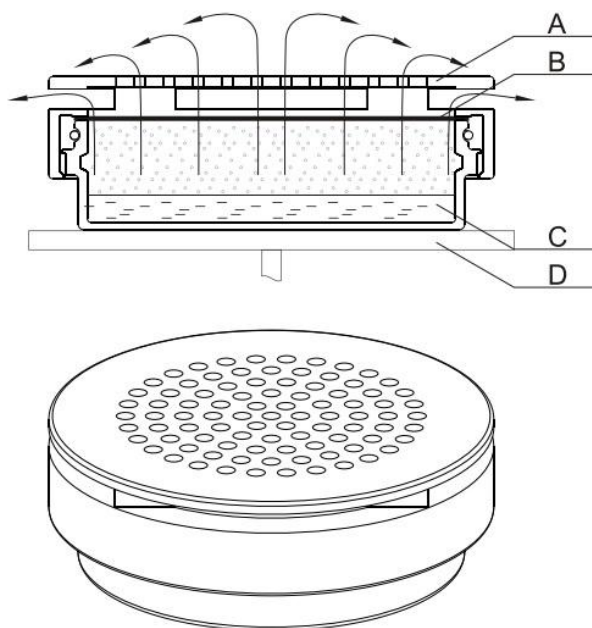
4.1. Set pro měření propustnosti vodních par



Obrázek 4 – set pro měření propustnosti vodních par [16]

Pomocí sady spolu s analyzátozem vlhkosti RADWAG MAX je měření propustnosti vodních par zkráceno na pouhých 60 minut – vhodné např. pro zkoušky materiálů v textilním a obuvnickém průmyslu. Běžné testy trvají okolo 72 hodin.

Sada se skládá z nádoby na vodu, uzavíratelnou proděravěným víkem na závit. Testovaný materiál je uchycen napnutý nad vodou. Celá nádoba s víkem a materiálem se umístí na analyzátor vážícího můstku do sušících vah.



Obrázek 5 – průřez sadou [16]

- A) víko nádoby
- B) vzorek
- C) voda
- D) vážící můstek analyzátoru [16]

Praktická část

5. Měření na analyzátoru vlhkosti Radwag MAX 60

5.1. Popis analyzátoru Radwag MAX 60

Sušicí váhy Radwag MAX 60 disponují malými rozměry a nevelkou vahou. Jsou vybaveny velmi malou vodováhou pro přesné měření. V sušící komoře o rozměrech 120x120x20 mm se nachází váhy měřící s přesností 1mg, teplotní čidlo a sada halogenových žárovek. Dále na přední straně vah můžeme vidět malý podsvícený displej a 12ti tlačítkovou klávesnici. Na zadní straně se nachází již zmíněná vodováha, napájení (230V, 50Hz, AC), sériový port RS 232 pro připojení k počítači a port PS/2 pro připojení klávesnice. Analyzátor vlhkosti může měřit vzorky nepřesahující 60 gramů při maximální teplotě 250°C. Výkon topného zařízení je asi 400 W a provozní teplota je $+15^{\circ}\text{C} \pm 40^{\circ}\text{C}$. [15]



Obrázek 6 - Sušicí váhy Radwag MAX 60 [15]

5.2. Princip měření paropropustnosti

Měření propustnosti vodních par je rozděleno do dvou částí. Nejprve se zjistí hmotnostní úbytek vody při měření na prázdno (tzv. nulový test, bez vložení měřeného

materiálu). Dalším měřením se zjistí hmotnostní úbytek vody při měření s daným vzorkem. Poté se propustnost vodních par stanoví dle vztahu:

$$P = \frac{M_1 - M_2}{M_{01} - M_{02}} \times 100 \text{ [%]}$$

Rovnice 14 - paropropustnost materiálu

kde P ... paropropustnost daného materiálu [%]
 M_1 ... hmotnost destilované vody při spuštění měření [g]
 M_2 ... hmotnost destilované vody po skončení měření [g]
 M_{01} ... hmotnost destilované vody při spuštění měření na prázdko [g]
 M_{02} ... hmotnost destilované vody po skončení měření na prázdko [g] [17]

5.3. Podmínky měření

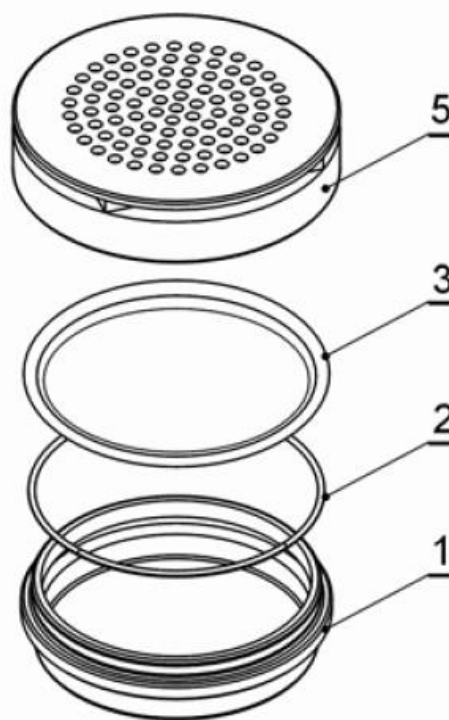
Před každým měřením je nutné vždy pozorovat zkušební podmínky. Jedná se hlavně o teplotu okolního vzduchu a relativní vlhkost. Měření může probíhat za okolní teploty mezi 21°C a 26 °C za předpokladu, že během měření se teplota nezmění více jak o 2°C od počáteční hodnoty. Relativní vlhkost může být v rozmezí 40% až 60% a během měření se nesmí změnit o více jak 5% hodnoty, při které bylo měření spuštěno. Pokud jsou tyto podmínky dodrženy, předpokládá se, že v sušící komoře jsou stabilní podmínky měření. V opačném případě můžeme měření pokládat za neplatné a opakovat jej. Dále je také potřeba před každým měřením nechat váhy spuštěny minimálně 30 minut a po každém měření nechat vychladnout na teplotu okolí. [17]

5.4. Postup měření – nulový test

Nulovým testem zjistíme, jaký je hmotnostní úbytek vody při stálé teplotě 40°C po 60 minut. Test probíhá naprázdno, tudíž bez zkoumaného materiálu. Nulové měření je měření, kterým porovnáváme všechna ostatní měření, proto je dobré si toto měření udělat opakovaně.

- 1) Spustíme analyzátor vlhkosti podle návodu v uživatelské příručce.
- 2) Sestavíme sadu na měření paropropustnosti dle

Obrázek 7. 1. Nádobka na vodu
 2. Tlakový kroužek



Obrázek 7 - sestavení sady pro nulový test [17]

3. Těsnící kroužek

5. Víko nádoby.

3) Ze sušící komory vyměníme vážící můstek analyzátoru za vážící můstek v sadě pro měření propustnosti vodních par.

4) Nastavíme program sušení:

- nastavíme stálou teplotu 40°C
- dobu ukončení po 60 minutách
- zobrazení výsledku v gramech.

5) Vložíme sadu na měřicí stojan, až se váhy ustálí, zmáčkne tlačítko ZERO/TARE. Tím nám dojde k vynulování vah a můžeme lépe odměřit dané množství destilované vody.

6) Poté do nádoby odměříme dané množství destilované vody (musí být minimálně 24hod v místnosti s analyzátozem vlhkosti, cca 3g), uzavřeme víkem a zavřeme sušící komoru (dané množství destilované vody si zapíšeme M_{01}).

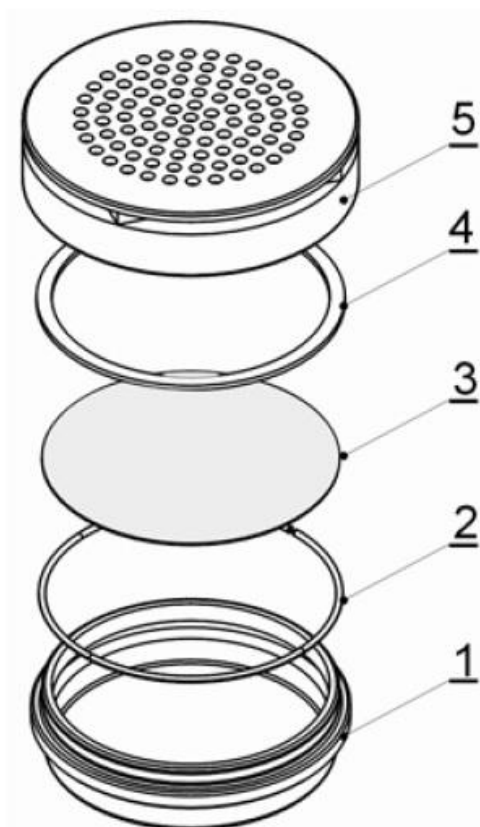
7) Ihned po zavření sušící komory začnou váhy měřit celých 60 minut, po celou dobu musíme hlídat podmínky měření, abychom neměli zkreslené výsledky. Během procesu měření můžeme pozorovat, jak váha v setu postupně ubývá. Také si můžeme všimnout dalších údajů na displeji, jako jsou hodiny, teplota v komoře, čas měření atd.

8) Po uplynutí 60 minut od uzavření sušící komory analyzátor vlhkosti dlouze pípne a zobrazí na displeji ještě jednou počáteční hodnotu destilované vody M_{01} » čas, jak dlouho měření trvalo (60 minut) » konečnou hodnotu destilované vody po měření M_{02} , tuto hodnotu zobrazí ještě jako hlavní velkými číslicemi. Tyto hodnoty je dobré si zkontrolovat a zapsat. [17]

5.5. Postup měření - s materiálem

Měření propustnosti vodních par s materiálem je skoro stejné jako měření nulového testu. Pouze abychom dodrželi podmínky měření, musíme si dát pozor, aby vzorek nebyl prověřený a nedotýkal se nám vodní hladiny v nádobě. Dále by testovaný vzorek měl mít pokojovou teplotu, být dostatečně velký (musí zakrýt celé víko nádoby z vnitřní strany) a nebyť zmáčený nebo jakkoli zdeformovaný. Pro větší přesnost měření lze test opakovat, nemusí to však být tolikrát, jako u nulového testu.

1) Spustíme analyzátor vlhkosti podle návodu v uživatelské příručce.



2) Sestavíme sadu na měření paropropustnosti dle Obrázek 8.

1. Nádobu na vodu
2. Tlakový kroužek
3. Těsnící kroužek
4. Testovaný vzorek
5. Víko nádoby.

3) Ze sušící komory vyměníme vážicí můstek analyzátoru za vážicí můstek v sadě pro měření propustnosti vodních par.

4) Nastavíme program sušení:

- nastavíme stálou teplotu 40°C
- dobu ukončení po 60 minutách
- zobrazení výsledku v gramech.

Obrázek 8 – sestavení sady pro test s materiálem [17]

5) Vložíme sadu na měřicí stojan, až se váhy ustálí, zmáčkne tlačítko ZERO/TARE. Tím nám dojde k vynulování vah a můžeme lépe odměřit dané množství destilované vody.

6) Poté do nádoby odměříme dané množství destilované vody (musí být minimálně 24hod v místnosti s analyzátozem vlhkosti, cca 5g), uzavřeme víkem a zavřeme sušící komoru (dané množství destilované vody si zapíšeme M_1).

7) Ihned po zavření sušící komory začnou váhy měřit celých 60 minut, po celou dobu musíme hlídat podmínky měření, abychom neměli zkreslené výsledky. Během procesu měření můžeme pozorovat, jak váha v setu postupně ubývá, ne však tak rychle jako u nulového testu. Opět si můžeme všimnout dalších údajů na displeji, jako jsou hodiny, teplota v komoře, čas měření atd.

8) Po uplynutí 60 minut od uzavření sušící komory analyzátor vlhkosti dlouze pípne a zobrazí na displeji ještě jednou počáteční hodnotu destilované vody M_1 » čas, jak dlouho měření trvalo (60 minut) » konečnou hodnotu destilované vody po měření M_2 , tuto hodnotu zobrazí ještě jako hlavní velkými číslicemi. Tyto hodnoty je dobré si zkontrolovat a zapsat. [17]

6. Testované vzorky

Pro měření paropropustnosti bylo použito běžně užívaných textilií (riflovina, bavlna, kůže), mikroperforované fólie a vzorků použitých ze vzorníku pojistných hydroizolačních membrán fólií a parozábran od společnosti JUTA.

Tabulka 1 - Testované vzorky

Vzorek	Zdroj	Složení	Značka	Specifikace
Riflovina	Jeany	99% Bavlna 1% Elastén	Orsay	Běžné jeany
Kůže	Neznámý zdroj	Neznáme	Bez značky	Nespecifikováno
Bavlna	Tričko	100% Bavlna	Nike	Běžné tričko
Teflonová fólie	Vzorník	Neznámé	Strima	Tkanina 20177
Mikroperforovaná fólie	Vzorník	výztužná mřížka a dvě vrstev polyetylenové laminované mikroperforované fólie	Juta	JUTAFOL D 110
Reflexní parozábrana	Vzorník	výztužná mřížka a dvě vrstvy polyetylenové laminované fólie a z reflexní aluminiová vrstva	Juta	JUTAFOL REFLEX 150
Parozábrana	Vzorník	Výztužná mřížka a dvě vrstvy polyetylenové laminované fólie	Juta	JUTAFOL N 110
Antikondenzační fólie	Vzorník	laminovaná tkanina a absorpční netkaná textilie na spodní straně	Juta	JUTACON 140
Kontaktní reflexní difúzní membrána	Vzorník	difúzní film, dvě vrstvy polypropylenové textilie a AL reflexní vrstva	Juta	JUTADACH 160 RF
Kontaktní difúzní membrána	Vzorník	výztužná mřížka, difúzního film a dvě vrstvy polypropylenové textilie	Juta	JUTADACH MASTER
Kontaktní difúzní zátěrová membrána	Vzorník	spodní netkaná polyesterová textilie a vrchní funkční zátěr	Juta	JUTA TOP
Fólie na odvětrané bednění	Vzorník	výztužná mřížka, dvě vrstvy speciální fólie a spodní ochranná netkaná textilie	Juta	JUTAFOL DTB 150

7. Výsledky

Každé nulové měření bylo provedeno 7x a ze všech výsledků byl stanoven aritmetický průměr. Měření s testovacími vzorky bylo opakováno 3x a taktéž byl stanoven aritmetický průměr. Ze stanovených aritmetických průměrů měření byly vypočteny výsledky dle Rovnice 14. Výsledky jsou k nahlédnutí v následující tabulce.

Tabulka 2 - výsledky měření

Měření	Hodnota aritmetického průměru M_p (M_{0p}) [g]	Hodnota paropropustnosti dle 1.nulového měření [%]	Hodnota paropropustnosti dle 2.nulového měření [%]
1. nulové ($M_{01}=3g$)	2,695		
2. nulové ($M_{01}=5g$)	4,717		
Riflovina ($M_1=5g$)	4,741	84,91803279	91,51943463
Kůže ($M_1=5g$)	4,765	77,04918033	83,03886926
Kůže ($M_1=8g$)	7,778	72,78688525	78,44522968
Bavlna ($M_1=5g$)	4,768	76,06557377	81,97879859
Teflonová fólie ($M_1=5g$)	4,998	0,655737705	0,706713781
Teflonová fólie ($M_1=7g$)	6,994	1,967213115	2,120141343
Mikroperforovaná fólie ($M_1=5g$)	4,987	4,262295082	4,593639576
Reflexní parozábrana ($M_1=5g$)	4,994	1,967213115	2,120141343
Reflexní parozábrana ($M_1=6g$)	5,993	2,295081967	2,473498233
Parozábrana ($M_1=5g$)	4,979	6,885245902	7,4204947
Antikondenzační fólie ($M_1=5g$)	4,992	2,62295082	2,826855124
Kontaktní reflexní difúzní membrána ($M_1=5g$)	4,926	24,26229508	26,14840989
Kontaktní difúzní membrána ($M_1=5g$)	4,882	38,68852459	41,69611307
Kontaktní difúzní zátěrová membrána ($M_1=5g$)	4,915	27,86885246	30,03533569
Fólie na odvětrané bedněni ($M_1=5g$)	4,986	4,590163934	4,946996466

8. Vyhodnocení a diskuze

Z dosažených výsledků jsme zjistili, že z testovaných materiálů dosahuje nejvyšší hodnoty propustnosti vodních par riflovina. Testovaná kůže byla nejspíše hovězí, upravená neznámým způsobem (starší vzorek). Zkušební materiál byl měkký na omak, mírně elastický, a proto si myslím, že to může být jeden z důvodů dosažení tak vysoké hodnoty paropropustnosti. Dalším předmětem zkoumání bylo, jak ovlivňuje měření jiná hodnota vody. Jak je patrné z tabulky výsledků, zvýšení množství vody pouze u nulového měření, zvýší také paropropustnost. Většinou se jedná v rámci výsledků o nepatrné změny. Pokud se však podíváme na kůži a porovnáme výsledek měření 5g při 1. nulovém testu s měřením 8g při 2. nulovém testu, vidíme, že výsledek se liší jen nepatrně. Z tohoto zjištění vyplívá, že pokud zachováme poměr množství vody, výsledky se budou téměř shodovat (5g:3g s 8g:5g). Pokud bychom, chtěli porovnat výsledky s jinými způsoby měření paropropustnosti, museli bychom přepočítat výsledky na stejné jednotky nebo alespoň na porovnatelné. Kompatibilita výsledků a jejich srovnatelnost již byla dokázána v práci z Technické university v Radomi. [17]

Závěr

Tato práce vysvětluje základní pojmy ohledně paropropustnosti. Je zde popsáno využití v různých oblastech průmyslu (textilní a potravinářský průmysl a stavebnictví). Také jsou zde uvedeny rovnice a vztahy používané v jednotlivých odvětvích. V práci je detailněji popsána jedna z možných metod stanovení propustnosti vodních par a to pomocí analyzátoru vlhkosti Radwag MAX 60. Na tomto přístroji byla provedena praktická část zahrnující popis, princip a postup měření propustnosti vodních par. Na vybraných vzorcích byli stanoveny propustnosti vodních par, které byly následně porovnány mezi sebou. Vypočtené výsledky se shodují s očekáváním.

Seznam použité literatury

- [1] HES, L. a SLUKA, P. *Úvod do komfortu textilií*. 1. vyd. Liberec: TUL, 2005. 109 s. ISBN 80-7083-926-0
- [2] *Propustnost vodních par PERMETEST*. [online]. [cit. 2014-06-03]. Dostupné z: www.kod.tul.cz/predmety/OM/cvicieni/PERMETEST.pdf
- [3] HES, L. *Nové metody tepelných měření při optimalizaci výroby a vlastnosti textilií*. Liberec, 1991. Doktorská (DrSc) disertační práce. Technická univerzita Liberec
- [4] SLUKA, P. *Výparný a hydraulický odpor vícevrstevných textilií*. Liberec, 2009. 98 s. Diplomová práce. Technická univerzita Liberec, Textilní fakulta.
- [5] *Šíření vodní páry a povrchová teplota*. [online]. [cit. 2014-06-03]. Dostupné z: kps.fsv.cvut.cz/file_download.php?fid=1619
- [6] HEJHÁLEK, J. *Difúze vodní páry obvodovou konstrukcí, Stavebnictví a interiér č. 3/2005*.
- [7] ČSN EN ISO 12572 : 2002 *Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků. Stanovení prostupu vodní páry*.
- [8] DROBEČEK, D. *Analýza funkčnosti parozábrany mechanicky kotvených střešních plášťů – změna metody měření*. [online]. [cit. 2014-06-03]. Dostupné z: www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2011/.../Drobecek_David_CL.pdf
- [9] ČSN 73 0540-2 (730540): 2012. *Tepelná ochrana budov. Část 2: Funkční požadavky*
- [10] ČSN EN ISO 13 788: 2012 *Tepelně vlhkostní chování stavebních dílců a stavebních prvků – Vnitřní povrchová teplota pro vyloučení vnitřní kritické povrchové vlhkosti a kondenzace uvnitř konstrukce – Výpočtové metody*
- [11] ČURDA, D. *Balení potravin*. 1. vyd. Praha: SNTL, ALFA, 1982.
- [12] KAČEŇÁK, I. *Obaly a obalová technika*. 1. vyd. Bratislava: SVŠT, 1990. ISBN 80-227-0301-X
- [13] KADLEC, P., MELZUCH, K., VOLDŘICH, M. *Co byste měli vědět o výrobě potravin? Technologie potravin*. 1. vyd. Ostrava: Key Publishing, 2009. 536 s. ISBN 978-80-7418-051-4.

[14] KADLEC, P., MELZUCH, K., VOLDŘICH, M. *Procesy a zařízení potravinářských a biotechnologických výroby*. 1. vyd. Ostrava: Key Publishing, 2012. 494 s. ISBN 978-80-7418-086-6.

[15] *Sušicí váhy série MAX*. [online]. [cit. 2014-06-03]. Dostupné z: http://www.vahy-radwag.cz/admin/files/ModuleItem/722-Prospekt_MAX.pdf

[16] *Set for determination of water vapour permeability*. [online]. [cit. 2014-06-03]. Dostupné z: www.radwag.com/pliki/foldery/folder_para.pdf

[17] *Water vapour permeability test through leather with application of moisture analyzer series MAC 50. Manufactured by RADWAG*. [online]. [cit. 2014-06-03]. Dostupné z: http://www.radwag.com/pliki/artykuly/practical_aspects_of_moisture_analysis.pdf

Seznam obrázků

Obrázek 1 - měřicí přístroj PERMETEST [2].....	8
Obrázek 2 – schéma přístroje PERMETEST [1]	9
Obrázek 3 – sušicí váhy Radwag MAX 60 [15]	17
Obrázek 4 – set pro měření propustnosti vodních par [16]	17
Obrázek 5 – průřez sadou [16]	18
Obrázek 6 - Sušicí váhy Radwag MAX 60 [15]	19
Obrázek 7 - sestavení sady pro nulový test [17]	20
Obrázek 8 – sestavení sady pro test s materiálem [17]	22

Seznam rovnic

Rovnice 1 - relativní propustnost pro vodní páry	10
Rovnice 2 - výparný odpor	10
Rovnice 3 - tepelný odpor	11
Rovnice 4 - hustota ustáleného difúzního toku	12
Rovnice 5 - difúzní vodivost materiálu	12
Rovnice 6 - faktor difúzního odporu	13
Rovnice 7 - ekvivalentní difúzní tloušťka	13
Rovnice 8 - rychlost prostupu látky	14
Rovnice 9 - propustnost celé vrstvené fólie	14
Rovnice 10 - koeficient propustnosti	15
Rovnice 11 - 1. Fickův zákon	15
Rovnice 12 - jednosměrná difúze	15
Rovnice 13 - jednosměrná difúze při konstantním difúzním koeficientu	16
Rovnice 14 - paropropustnost materiálu	20

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Testované vzorky	23
Tabulka 2 - výsledky měření	24