



Analýza nanovláknenných membrán pro oděvní účely

Bakalářská práce

Studijní program: B3107 – Textil
Studijní obor: 3107R007 – Textilní marketing
Autor práce: **Vít Chaloupka**
Vedoucí práce: Ing. Roman Knížek, Ph.D.





Analysis of nanofibrous membranes for use in functional clothinga

Bachelor thesis

Study programme: B3107 – Textil
Study branch: 3107R007 – Textile marketing
Author: **Vít Chaloupka**
Supervisor: Ing. Roman Knížek, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vít Chaloupka**
Osobní číslo: **T12000297**
Studijní program: **B3107 Textil**
Studijní obor: **Textilní marketing**
Název tématu: **Analýza nanovlákných membrán pro oděvní účely**
Zadávací katedra: **Katedra hodnocení textilií**

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

- 1) Prostudujte problematiku v oblasti výroby nanovláken, komfortu textilií se zaměřením na membrány pro oděvní průmysl a hydrofóbní úpravy textilních povrchů
- 2) U dodaných nanovlákných vrstev změřte:
- plošnou hmotnost - prodyšnost - paropropustnost - hydrostatickou odolnost
- 3) U dodaných nanovlákných vrstev vytvořte snímky na rastrovacím mikroskopu a obrazovou analýzu
- 4) V závěru zhodnoťte naměřené výsledky.



Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Růžičková J.: Elektrostatické zvlákňování nanovláken, Technická univerzita v Liberci, Liberec 2004

Knížek R.: Oděvy pro sportovní a outdoorové aplikace, Technická univerzita v Liberci, Liberec 2013

Hes L, Sluka P: Komfort textilií, Technická univerzita v Liberci, Liberec 2005

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Roman Knížek

Katedra hodnocení textilií

Konzultant bakalářské práce:

Ing. Denisa Karhánková

Katedra hodnocení textilií

Datum zadání bakalářské práce: 27. února 2015

Termín odevzdání bakalářské práce: 8. ledna 2016



Ing. Jana Drašarová, Ph.D.
děkanka



doc. Ing. Vladimír Bajzík, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 2. prosince 2015

Žádost o změnu termínu odevzdání závěrečné práce

Jméno a příjmení: Vít Chaloupka
Osobní číslo: T12000297
Studijní program: B3107 / Textil
Studijní obor: 3107R007 / Textilní marketing
Zadávající katedra: KHT

Žádám o změnu termínu odevzdání bakalářské práce z 8. 1. 2016 na 5. 5. 2017

Odůvodnění žádosti:

V Liberci dne: 7. 1. 2016

Podpis:

Vyjádření vedoucího práce:

Vyjádření vedoucího katedry:



Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl především poděkovat vedoucímu své bakalářské práce Romanu Knížkovi za odborné vedení, podnětné rady a připomínky při zpracování této práce. Dále děkuji Janě Grabmüllerové a Monice Vyšanské za pomoc při vyhotovení a vyhodnocení snímků na rastrovacím mikroskopu a v neposlední řadě Vladimíru Bajzikovi za cenné rady při zpracování statistických údajů.



ANOTACE

Tato bakalářská práce pojednává o analýze nanovláknenných membrán dodaných společností Nanomembrane. V teoretické části práce je popsána problematika outdoorových oděvů, komfortu textilií se zaměřením na membrány pro oděvní průmysl, finální úpravy textilních povrchů, oblast výroby nanovláken a nanovláknenných membrán. V experimentální části je provedeno měření a hodnocení plošné hmotnosti, prodyšnosti, parapropustnosti, hydrostatické odolnosti a pomocí obrazové analýzy je zjištěn počet pórů, ekvivalentní a Feretův průměr dodaných nanovláknenných membrán v nízkých plošných hmotnostech od 1 g/m² do 5 g/m².

KLÍČOVÁ SLOVA: nanovláknena, membrána, plošná hmotnost, prodyšnost, parapropustnost, hydrostatická odolnost, obrazová analýza, mezivláknenná pórozita.

ANNOTATION

This bachelor thesis is to deal with the analysis of nanofibrous membranes supplied by Nanomembrane company. Theory of thesis concerns outdoor clothes issues, comfort of textile dealing with membranes for clothing industry use, textile surface finishes, nanofibres and nanofibrous membranes manufacturing. The experimental part is about measurements and evaluation parametres such as unit of area, permeability, vapour permeability, hydrostatic resistance and image analysis that helps to analyse amount of pores, equivalent diameter of pores and Feret diameter. The supplied nanofibrous membranes were in the low unit of areas ranging from 1 g/m² to 5 g/m².

KEY WORDS: nanofibres, membranes, unit of area, permeability, vapour permeability, hydrostatic resistance, image analysis, interfibre porosity.

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| ÚVOD..... | 10 |
| 1. KOMFORT TEXTILIÍ..... | 11 |
| 1.1 Paropropustnost..... | 11 |
| 1.2 Prodyšnost..... | 14 |
| 1.3 Hydrostatická odolnost..... | 15 |
| 1.4 Oděvní systém..... | 17 |
| 1.5 DWR úpravy a zátěry v oděvním průmyslu..... | 18 |
| 1.5.1 DWR úpravy..... | 18 |
| 1.5.2 Zátěry..... | 18 |
| 2. MEMBRÁNY..... | 19 |
| 2.1 Mikroporézní - hydrofobní membrány..... | 20 |
| 2.2 Neporézní - hydrofilní membrány..... | 21 |
| 2.3 Typy laminátů..... | 23 |
| 2.4 Finální úpravy textilií..... | 24 |
| 3. NANOVLÁKENNÁ MEMBRÁNA..... | 28 |
| 3.1 Nanovlákná..... | 28 |
| 3.2 Elektrostatické zvlákňování..... | 29 |
| 3.2.1 Zvlákňovací zařízení Nanospider..... | 29 |
| 3.3 Ochranné finální úpravy nanovláknenných membrán..... | 30 |
| 3.3.1 Technologie finální úpravy nanovláknenné membrány – plazma..... | 30 |
| EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST..... | 32 |
| 4. ANALÝZA NANOVLÁKENNÝCH MEMBRÁN..... | 32 |
| 4.1 Charakterizace vzorků..... | 32 |
| 4.2 Plošná hmotnost..... | 33 |
| 4.3 Prodyšnost..... | 35 |
| 4.4 Paropropustnost..... | 37 |
| 4.5 Hydrostatická odolnost..... | 40 |

| | | |
|--|-------------------------------------|-----------|
| 4.6 | Obrazová analýza | 42 |
| 4.6.1 | Počet pórů na cm ² | 43 |
| 4.6.2 | Ekvivalentní a Feretův průměr | 45 |
| ZÁVĚR | | 55 |
| SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | | 57 |
| SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ | | 61 |
| SEZNAM PŘÍLOH..... | | 63 |

Úvod

Cílem této bakalářské práce je analýza vzorků nanovláknenné textilie používané na nanovláknenné membrány. Technická univerzita v Liberci a společnost Svitap vyvinuli unikátní membránu, která je vyrobena z nanovláken. V současnosti je producentem této nanovláknenné membrány, která vyniká oproti ostatním komerčním membránám extrémně vysokou parapropustností, společnost Nanomembrane.

Membránou se rozumí tenká vrstva polymerního materiálu nanoseného na podkladový materiál, který zaručuje pevnost a odolnost proti mechanickému poškození materiálu. Účelem oděvní textilie s membránou je udržet lidský organismus v optimálním stavu za jakýchkoliv nepříznivých klimatických podmínek.

Teoretická část práce, která se zaměřuje na komfort textilií, druhy a typy membrán a jejich výrobce, se věnuje dosavadní výrobě nanovláknenných membrán zohledňující nanovláknenný materiál s plošnou hmotností od 5 g/m² a více. Zároveň představuje společnost Nanomembrane.

V experimentální části práce je pak rozebrána analýza, která by mohla potvrdit v budoucnosti možnost výroby nanovláknenné membrány s plošnou hmotností už od 1 g/m². K tomuto experimentu budou analyzována měření hydrostatické odolnosti, parapropustnosti, prodyšnosti a pórovitosti nanovláknenné textilie vyrobené s plošnou hmotností v rozmezí od 1 do 5 g/m². Analýzy z měření pak potvrdí nebo zamítnou možnost využití nanovláknenné membrány s plošnou hmotností pod 5 g/m² za účelem jak finanční efektivnosti, tak dosažení lepšího komfortu v souvislosti s parapropustností. [6].

Membrána posouvá komfort oblečení výrazně výše - neprofoukne, nepromokne a zajišťuje parapropustnost, neboli odvod kapalných par z těla. Optimální hodnoty a podmínky komfortu oděvů ovlivňuje druh použitých materiálů a jejich vlastnosti.

1. Komfort textilií

Obecně lze komfort definovat jako absenci znepokojujících a bolestivých vjemů. Nošení oděvu by mělo být pak příjemné a žádoucí. Komfort textilií zahrnuje komfort psychologický, sensorický a termofyziologický. Psychologický komfort lze rozdělit podle těchto hledisek: klimatické, ekonomické, historické, kulturní, sociální, skupinové a individuální.

Senzorický komfort zahrnuje vjemy a pocity člověka při styku pokožky a první částí oděvu. Ty mohou být příjemné (měkkost, splývavost) nebo nepříjemné a dráždivé (jako je tlak, vlhkost, škrábání, kousání, píchání, lepení apod.). Dále lze rozdělit sensorický komfort na komfort nošení a na omak, kdy komfort nošení zahrnuje: strukturu použitých textilií, vybrané mechanické vlastnosti ovlivňující rozložení sil a tlaků v oděvním systému, schopnost textilií absorbovat a transportovat plynnou a kapalnou vlhkost s dopadem na kontaktní vlastnosti, kdy sensorický komfort souvisí s komfortem fyziologickým. Vznikající pocity označujeme jako termofyziologický komfort, což je optimální stav organismu, kdy nepřevládají pocity tepla ani chladu. Je dán schopností textilie transportovat teplo a vlhkost za normální situace, kdy nedochází k pocení (v klidovém režimu) a za nestandardní situace, kdy dochází k mírnému až silnému pocení. Termofyziologický komfort nastává za těchto optimálních podmínek, kterou definuje tepelný komfort pro lidské tělo v klidu. Tělo je v tepelné rovnováze, žádný svalový třes ani rozšiřování cév, žádné základní pocení (relativně suchá kůže), teplota kůže mezi 32 – 34 °C, žádná akumulace tepla nebo ztráty [1].

1.1 Paropropustnost

Prostup vodní páry (potu) skrz oděvní systém od nositele do vnějšího prostředí se nazývá paropropustnost. Jestliže se má nositel oděvu cítit komfortně, je nutné, aby všechny vrstvy oblečení byly paropropustné. S paropropustností souvisí výparný odpor, což je parametr, kterému je relativní propustnost pro vodní páry nepřímo úměrná.

Propustnost textilií pro vodní páry se nejčastěji hodnotí pomocí výparného odporu Ret [$\text{Pa}\cdot\text{m}^2/\text{W}$] podle ISO 11092. Vzniklá hodnota je důležitým měřítkem při ochlazování těla, kdy se odpařuje pot z pokožky. Čím je nižší hodnota Ret [$\text{Pa}\cdot\text{m}^2/\text{W}$], tím je propustnost textilie pro vodní páry vyšší. Další používaná metoda pro propustnost textilií je MVTR (Moisture Vapor Transmission Rate) v jednotkách [$\text{g}/\text{m}^2/24\text{hod}$], se pak

označuje jako propustnost vodních par a je měřena podle ASTM E96-BW a ISO 2528. MVTR vyjadřuje hmotnost vodních par, kterou dokáže materiál propustit za 24 hodin přes 1 m² materiálu. Nevýhodou je skutečnost, že z této jednotky není ihned jasné, při jaké vlhkosti vnějšího vzduchu k příslušné propustnosti dochází [1].

Hodnocení propustnosti textilií pro vodní páry v těchto jednotkách je podle stávajících norem ISO následující [1]:

- Ret < 6 - velmi dobrá (nad 20 000 g/m²/24hod),
- Ret 6 - 13 - dobrá (9000 – 20 000 g/m²/24hod),
- Ret 13 - 20 - uspokojivá (5000 – 9000 g/m²/24hod),
- Ret > 20 - neuspokojivá (pod 5000 g/m²/24hod).

Vlhkost (pot) z povrchu kůže přes textilii (oděvní systém) prostupuje prostřednictvím pórů ve směru nižšího parciálního tlaku vodní páry. Tento proces nazýváme *difúze*. Difuzní odpor jednotlivých oděvních vrstev, které jsou různého druhu a kvalit (tričko, košile, bunda) se počítá, přičemž důležitou roli zde hraje odpor vzduchových mezivrstev. Vteřinové množství páry: m* [kg/m²s] (1) přenášené difuzní vrstvou klidného vzduchu je úměrné difuznímu koeficientu Dp (kg/m.s.Pa) (2) a gradientu parciálního tlaku Δp parc./ Δx podle Fickova zákona [1]:

$$m^* = -D_p \cdot \Delta p_{\text{parc}} / \Delta x = -D_p \cdot (p_{\text{swat}} - p_{\text{we}}) / h = (p_{\text{swat}} - p_{\text{we}}) / R, \quad (3)$$

kde

$$R_{\text{wp}} = h/D_p \quad (4) \qquad \text{nebo} \qquad R_{\text{wc}} = h/D_c \quad (5)$$

V porézním prostředí je pára přenášena otvory (kanály), které existují v jednotlivých oděvních vrstvách. Pokud chybí vliv volného proudění nebo tzv. pumpovací efekt vyvozený ventilací, je odpor proti průchodu vodní páry dán vztahem [1]:

$$R_{\text{wp}} = \xi \cdot h / \varepsilon \cdot D_p \quad (6)$$

Zvýšení odporu proti přenosu vlhkosti porézními textilními materiály oproti hladině nad volnou mezerou způsobuje klesající koeficient porosity $\varepsilon < 1$ a zvětšující se délka kanálů charakterizována faktorem tortuosity $\xi < 1$. Následně může být odpor proti přenosu vodní páry R_{wf} materiálu poměrně vysoký. Díky větší porozitě mají materiály jako pleteniny vyšší propustnost vodních par nebo nižší odpor proti přenosu vodní páry [1].

Kapalný pot, který ulpívá na kůži, je v přímém kontaktu s první textilní vrstvou a jejími kapilárními cestami a vzlíná do této plochy všemi směry (tzv. knotový efekt). Jedná se o způsob *kapilární*. Kapilární tlak ΔP , způsobující tok kapalné vlhkosti obecně od velkých pórů o efektivním poloměru R k malým pórům odpovídajícího poloměru r , je úměrný povrchovému napětí vody γ a funkci \cos kontaktního úhlu Θ (charakterizující smáčecí schopnost této textilie) [1].

Sorpční proces je nejpomalejší a je podmíněn použitím textilie obsahující částečně sorpční vlákna. Nastává po vzniku vlhkosti nebo kapalného potu do neuspořádaných mezimolekulárních oblastí a následně navázání na hydrofilní skupiny ve struktuře vlákna.

Všechny tři zmíněné mechanismy transportující vlhkost se zúčastňují současně. Nejrychlejší je kapilární a difuzní, na posledním místě je pak způsob sorpční [1].

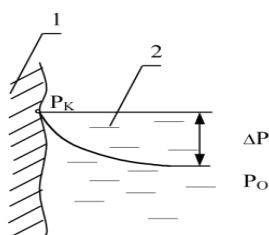
V rámci termoregulační činnosti produkuje organismus vodu ve formě potu. Při teplotě kůže do $34\text{ }^{\circ}\text{C}$ uvolňuje tělo asi $0,03\text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$ a nad tuto teplotu až $0,7\text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$ potu. Ochlazovací efekt vznikne pouze při odpaření potu. U volného povrchu kůže je jedinou podmínkou odparu dostatečný rozdíl parciálních tlaků páry [1]. Odvod kapalné vlhkosti z povrchu lidského těla:

1 - pokožka 2 - venkovní vzduchová vrstva

Spád parciálního tlaku páry vyjádříme následovně:

$$\Delta P = P_k - P_o \quad (7)$$

P_k – parciální tlak páry u pokožky, P_o – parciální tlak páry v okolním vzduchu



Obr. 1 Odvod kapalné vlhkosti [1]

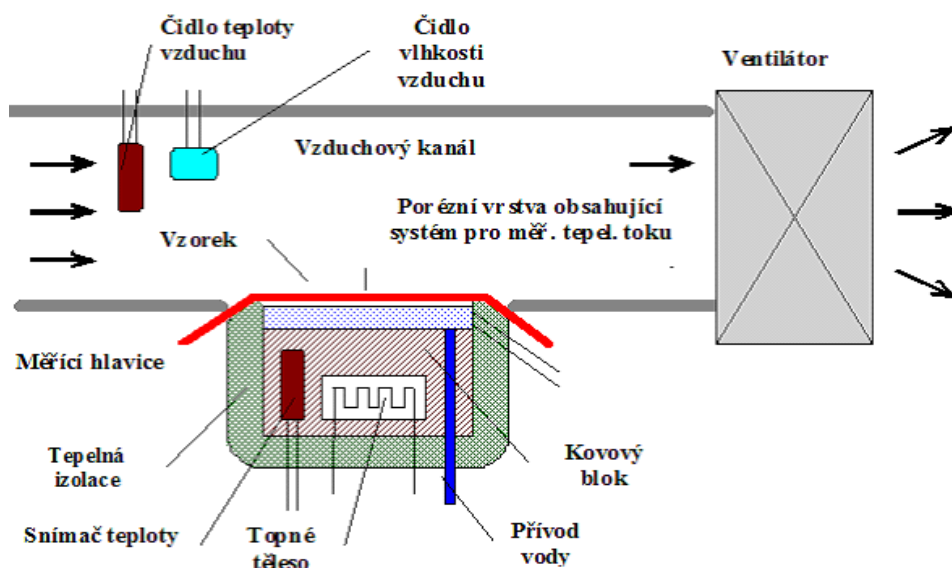
Způsoby hodnocení paropropustnosti

Existuje více metod k hodnocení paropropustnosti. Některé přístroje dokážou změřit výparný odpor za podmínek blízkých režimu lidského těla, jiné pouze jako fyzikální děj bez vlivu dalších podmínek. Měření, která zohledňují procesy v systému

pokožka-oděv-prostředí, jsou věrnější. Mezi přístroje, které měří paropropustnost patří Permetest.

Permetest je poloautomatický přístroj k určení tepelného a výparného odporu a relativní propustnosti textilií pro vodní páru, případně sledování dynamiky přenosových jevů. Jedná se v podstatě o skin model malých rozměrů, který není nákladný. Zkouška spočívá v měření tepelného toku proudícího modelem lidské pokožky, který je porézní a zavlhčován, čímž se simuluje pocení. Při měření výparného odporu a paropropustnosti je měřicí hlavice udržována na teplotě okolního vzduchu 20 - 23 °C, přičemž je vzorek položen na povrchu separační folie a je ofukován. Výparný tepelný tok snímáný při měření je přímo úměrný paropropustnosti a nepřímo úměrný výparnému odporu. Vždy je nutno provést nejprve měření bez vzorku a poté se vzorkem. Při měření tepelného odporu je měřicí hlavice suchá a udržuje se na teplotě o 10 - 20 °C vyšší, než je teplota okolního vzduchu. Přístroj měří tepelný tok odváděný konvekcí do okolního vzduchu.

Výsledky získané na přístroji Permetest jsou uváděny pomocí parametrů, které odpovídají normě ISO 110 92.



Obr. 2 Schéma přístroje Permetest [1]

1.2 Prodyšnost

Prodyšnost je prostup vzduchu přes oděvní systém z vnějšího prostředí k nositeli a odvádění tepla, které vzniká při fyzické zátěži. Je vyjádřena jako rychlost proudění vzduchu danou plochou textilie za určitý čas. U některých zejména sportovních oděvů je

vysoká prodyšnost žádoucí. U zimního oblečení nebo oblečení pro vysokohorskou turistiku, které je vystaveno chladicímu účinku, je naopak vysoká prodyšnost zakázána. V každém případě je prodyšnost textilií velmi důležitou vlastností, kterou je zapotřebí hodnotit.

Vývoj moderních měřících metod a přístrojů je zaměřen na postupy nedestrukční, umožňující měření na hotových výrobcích bez jejich zničení, jelikož u běžných měřících metod to nelze provést bez vystřížení vzorku v daných rozměrech a tím i zničení výrobku [1, 2].

Způsoby hodnocení prodyšnosti

Jedním takovým přístrojem je FX 300 pro měření prodyšnosti textilií od firmy Textest. Jeho princip spočívá ve vytvoření tlakového rozdílu mezi oběma povrchy testované textilie (nejčastěji 100 Pa) a měření takto vyvolaného průtoku vzduchu. Testovaná plocha činí 5 cm² nebo v poslední době 20 cm². Propustnost se vyjadřuje v m³/m².s, po zkrácení v m.s⁻¹. měřená textilie či oděv se vkládají do přístroje vcelku, není třeba vzorek o speciálních rozměrech.



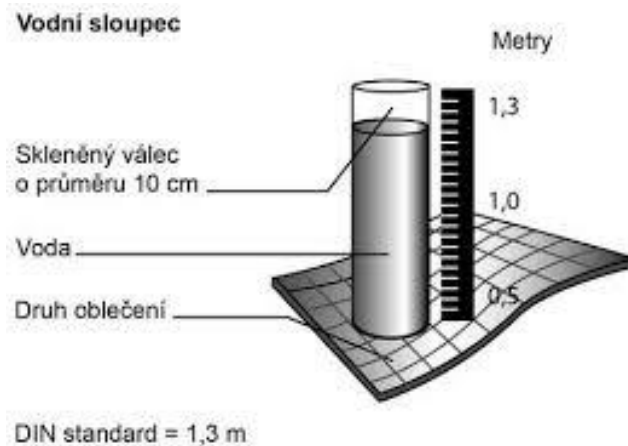
Obr. 3 Ukázka přístroje FX 300 (vlastní fotografie)

1.3 Hydrostatická odolnost

Hydrostatická odolnost plošných textilií je důležitým parametrem pro kvalitu výrobku. Je to odolnost proti pronikání vody, vyjadřující se výškou vodního sloupce, který působí na zkoušenou plochu textilie [1].

Vodní sloupec je pomocný údaj, který vyjadřuje schopnost materiálu odolávat hydrostatickému tlaku. Čím je hodnota vyšší, tím je materiál odolnější vůči promoknutí.

Ve speciálních zařízeních se vodní sloupec měří na přístrojích k tomu určených a hodnota tlaku se poté převádí na výšku vodního sloupce v milimetrech či metrech. Velmi jednoduše jde měřit hydrostatickou odolnost tak, že se k materiálu přiloží skleněný válec o průměru 10 cm, který se naplní vodou. Voda ve válci působí na materiál a po průniku prvních tří kapek je určena hodnota hydrostatické odolnosti. Měření se používá pro produkty, které nemají propustit vodu, například stany, batohy, oblečení a další [2].

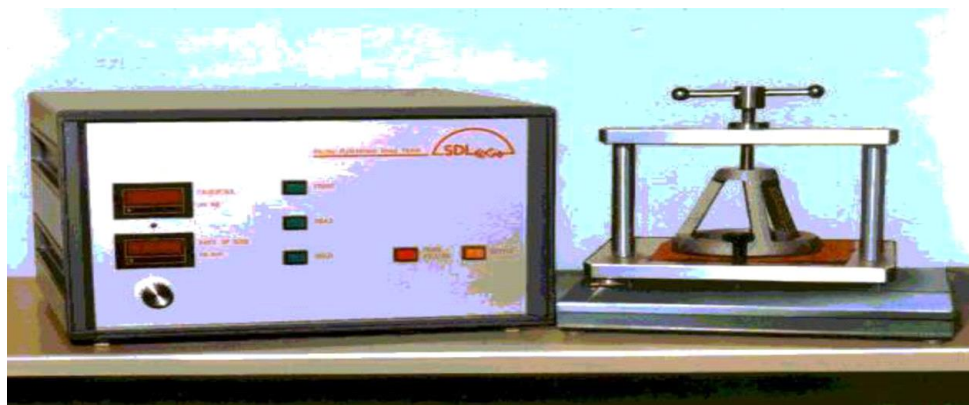


Obr. 4 Zjednodušený model měření hydrostatické odolnosti [2]

Za nepromokavé materiály lze označit oblečení s hodnotou výšky vodního sloupce od 1300 mm. Taková kvalita stačí k zadržení dešťových kapek. Pod popruhem batohu však voda proniká do oblečení tak, jakoby působil tlak až 20 000 mm výšky vodního sloupce (důležitá váha), tomuto tlaku způsobeného batohem říkáme tzv. klínový efekt. Také při pádu do mokrého sněhu dosahuje hodnota tlaku až 20 000 mm. Z toho plyne nutnost rozdělit nepromokavost oblečení s ohledem na konkrétní způsoby užívání [2].

Měření hydrostatické odolnosti

FX3000 HYDROTESTER III je vyrobený společností SDL/ATLAS, který automaticky detekuje kapky. Měření podle normy ISO 811:1981 platí pro Stanovení odolnosti proti pronikání vody. Zkouška tlakem vody. Výsledky zkoušky se uvádějí v centimetrech vodního sloupce [1].

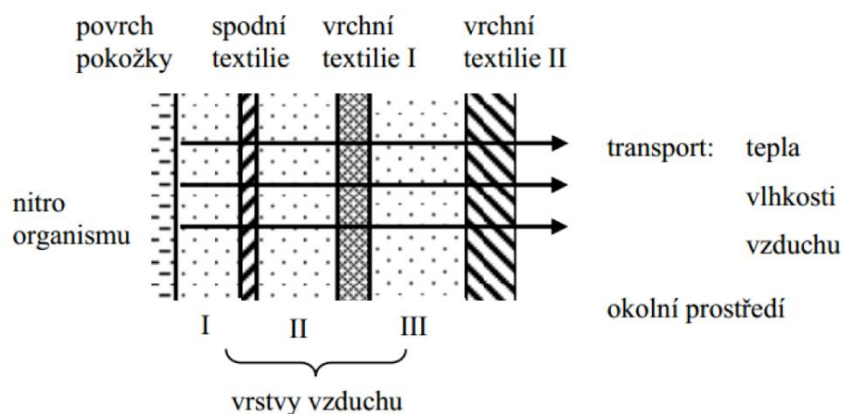


Obr. 5 Příklad přístroje FX3000 pro měření hydrostatické odolnosti textilií od firmy SDL/ATLAS

1.4 Oděvní systém

Oděv je produkt vyrobený z textilního materiálu určený na pokrytí lidského těla, který se samostatně obléká na určitou část těla. Účelem oděvu je ochrana před klimatickými, mechanickými a tepelnými vlivy, zakrytí nahoty, okrasa nebo jako hygienický doplněk.

Ochranný systém oděvu napomáhá termoregulaci organismu. Při tom dochází k prostupu tepla a vlhkosti. Oděvní systém se skládá, jak už bylo řečeno, z několika oděvních mezivrstev, mezi něž patří spodní textilie, vrchní textilie I a vrchní textilie II (ad.) a zde dochází k transportu tepla, vlhkosti a vzduchu od nitra organismu do okolního prostředí [1].



Obr. 6 Ukázka třívrstvého oděvního systému [1]

1.5 DWR úpravy a zátěry v oděvním průmyslu

1.5.1 DWR úpravy

DWR je pro úpravy oděvu, která znamená „Durable Water Repellent“, neboli trvanlivě vodě repelentní. DWR úprava zabráňuje vodě, aby prosákla skrz oblečení a dostala se k pokožce. Pomocí impregnací se dosáhne toho, že textilie je odolná vůči kapalinám, nečistotám a zároveň zvýší mechanické vlastnosti oděvu jako je resistance proti otěru. Textilie, které jsou upravovány vodoodpudivými činidly, jako jsou fluokarbonové prostředky, hydrofobní přípravky na bázi silikonů nebo parafinovými emulzemi jsou ošetřeny ještě předtím, než se oděv nastříhá a ušije. S touto úpravou jsou pak produkty nesmáčivé a voda po povrchu jednoduše steče. DWR je nutné pravidelně obnovovat, sušit při středních teplotách, opatrně žehlit nebo nechat odborně vyprat či nanést [2, 7].

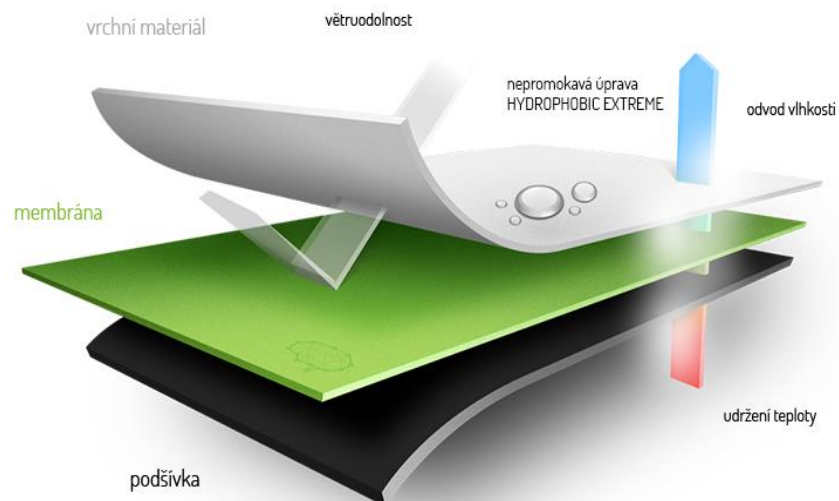
1.5.2 Zátěry

Zátěry jsou paropropustné a hydrofobní. Jedná se o povrstvení nebo zatírání latexy či pryskyřicemi (směsné disperze syntetických kopolymerů - polyuretan, akrylát, polyvinylchlorid, chloroprenový kaučuk, apod.). Zátěry jsou nanášeny na textilii buď přímo, nebo laminací. Správný poměr mezi prodyšností a nepromokavostí určí síla a hustota nanášené vrstvy. Nejvíce se tato úprava používá na plachtoviny, svrchní oděvy, batohy a stany a vyznačuje se nižší cenou oproti membránám [2, 8].

2. Membrány

Membrána je speciální tenká vrstva polymerního materiálu – fólie. Tloušťka membrány bývá řádově v mikrometrech. Jako materiál pro membránu se nejčastěji používá polytetrafluoretylen (PTFE), polyester (PES) nebo polyuretan (PU). Nevýhodou membrány je, že se z mechanického hlediska nechová stejně jako textilie a kvůli své nízké pevnosti musí být umístěna na nosné tkanině. Membránové materiály se laminují lepením nebo tavením na nosné vrchové nebo podšívkové textile. Membrána má za úkol nepropustit vodu zvenčí, ale umožnit průstup vodních par směrem od těla. Membrány rozdělujeme do skupin dle různých hledisek/vlastností: podle použitého materiálu na jejich výrobu, vnitřní strukturu, uspořádání vrstev apod. Záleží jakou funkci membrány uživatel očekává a aby její parametry a vlastnosti reflektovaly vlivy vnějšího prostředí. Funkce a umístění membrány lze vidět na obr. 7.

V současné době se výrobci membrán dělí do dvou skupin. Záleží, zdali vyrábí porézní nebo neporézní membrány. Mezi nejznámější výrobce, zároveň značky membrán, které vyrábí, patří membrány: Gore-Tex, eVENT, Toray Entrant G2 XT, Sympatex, Nanomembrane, Conduit, Membrain od Marmot, Omni-Tech atd. V této práci jsou rozvedeny pouze nejznámější výrobci na trhu.



Obr. 7 Funkce a umístění membrány [9]

Výhodou hydrofilních polyuretanových membrán je, že mají dobrou přilnavost na textilním podkladu (substrátu), voděodolnost a odolnost proti rozpouštědlům a jsou méně nákladné oproti ostatním metodám/ technologiím [10].

2.1 Mikroporézní - hydrofobní membrány

PTFE membrána (polytetrafluorethylen) obsahují velké množství mikropórů, které prochází membránou. Jedná se o velké množství mikroskopických pórů o průměru 0,1 – 3 μm , kterými se vlhkost transportuje skrze oděv ven. Mikroporézní membrány dosahují vysokých hodnot paropropustnosti (přes 20 000 $\text{g}/\text{m}^2/24$ hod) a vodního sloupce i více než 20m. Důležitá je správná údržba, která předpokládá použití vhodných prostředků [11].

Gore-tex

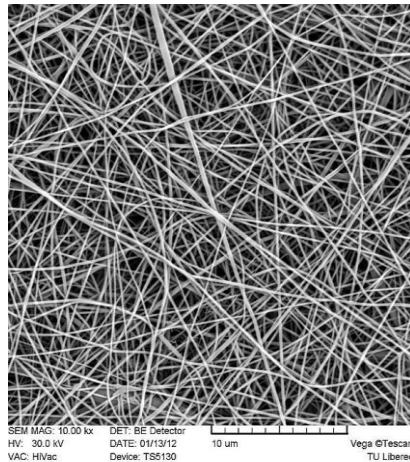
Nejznámější zástupce mikroporézních membrán, které jsou vyráběny z fólie polytetrafluoretylenu (PTFE) mající přes 1,4 miliardy mikropórů na centimetr čtvereční [17]. Výrobce na svých stránkách uvádí, že tyto póry jsou 20 000krát menší než kapka vody a zároveň 700krát větší než molekula vodní páry [18]. To vysvětluje, že kapalina nemůže proniknout skrz Gore-tex membránu, ale odvede vodní páru. Tímto vyznačuje membrány jako nepromokavé, větruvzdorné, ale zároveň paropropustné.

Nanomembrane

Prozatím jediný český výrobce porézní membrány v Čechách a ve světě, která je vyrobena z nanovláken. Společnost vyrábí membránu pod značkou Nanomembrane.

Membrána, vyrobená z polyamidu 6, se vyznačuje vysokou paropropustností, která je dána unikátní nanovláknennou strukturou. Průměr nanovláken, který je pouhých 150 nm (nejjemnější vlákna, která jsou použita v oděvním průmyslu). Díky této struktuře a průměru nanovláken mají membrány více porů na danou plochu oproti mikroporézním membránám. Výsledkem je paropropustnost Ret pod 1,5 $\text{Pa}\cdot\text{m}^2/\text{W}$ dvouvrstvého laminátu (vrchní tkanina + nanovláknenná membrána) [2, 19].

Hydrostatická odolnost nanovláknenné membrány se pohybuje od základních 5000 mm a více při zachování vysoké paropropustnosti [19].



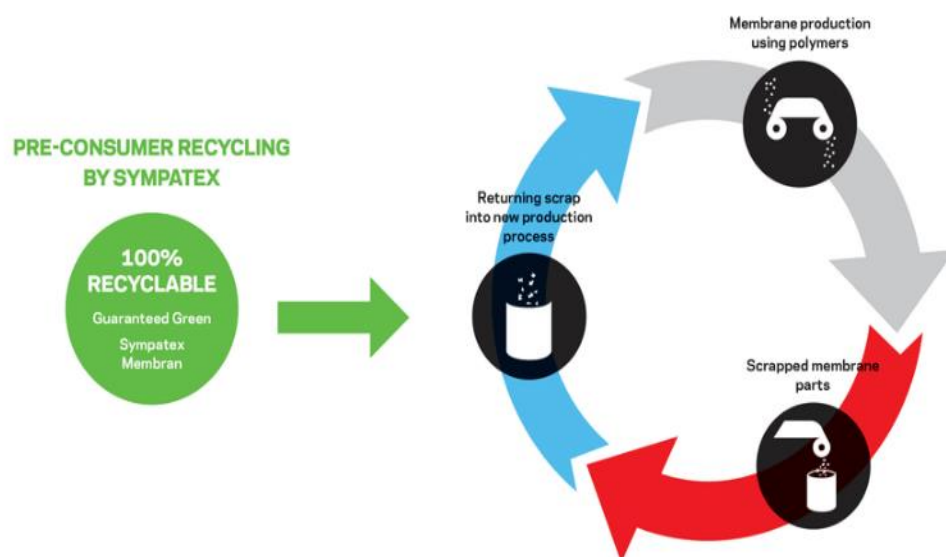
Obr. 8 Ukázka mikroskopického snímku nanovlákněné membrány
Nanomembrane vyrobená z polyamidu 6 (vlastní snímek)

2.2 Neporézní - hydrofilní membrány

Tyto membrány pracují na odlišném principu. Jejich povrch je zcela neporézní, výrazně homogenní a průměr pórů je menší než 0,001 μm . Membrána se také označuje jako hydrofilní, protože vlhkost se šíří celou strukturou materiálu a dále vlhkost prostupuje materiálem až na povrch, kde se odpařuje. Jedná se o princip převodu par, podobný průběhu výměny látek přes buněčnou membránu živých organismů. Kondenzující voda (pot) na vnitřní straně membrány nebo zátěru je rozváděna do vlastního materiálu a chemicky transportována navenek. Nevýhodou u hydrofilních membrán je nulový přenos plynů a horší parapropustnost [1, 12].

Sympatex

Společnost sídlící v Německu, v Mnichově, má ve světě několik poboček. Jejich technologie a procesy spočívají v udržitelnosti a oblasti životního prostředí, a to tím, že membrány jsou vyrobeny ze 100% recyklovatelných materiálů (PES), což prozatím nenabízí žádný výrobce oděvních membrán na světě [2, 20].



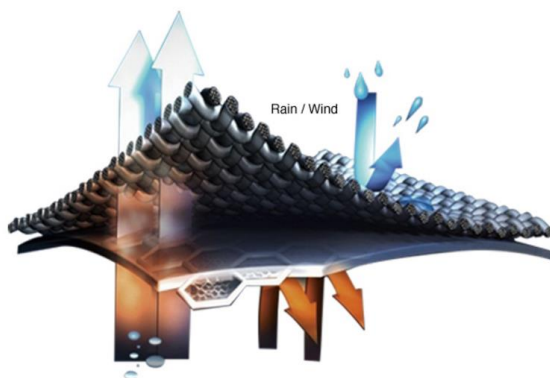
Obr. 9 Ukázka recyklovatelnosti ve firmě Sympatex [20]

Neporézní hydrofilní fólie je vyrobena ze směsi 70 % hydrofobního polyesteru a 30 % z hydrofilního polyethylenu. Tloušťka fólie je od 5 μm do 25 μm . Je 100 % nepromokavá a větruvzdorná díky tloušce 25 m vodního sloupce a propustností 1,5 Pa.m²/W [2].

Dermizax

Japonský výrobce Toray vyrábí chytrou neporézní membrány, které dosahují vysoké parapropustnosti, vyznačují se vysokou elasticitou, hladkou a lehkou strukturou, ultra malou tloušťkou a nepromokavostí. Fungují na mechanismu molekulové struktury polyuretanu (PU), kdy mezi molekulami jsou velké mezery a vzájemné síly, kterými na sebe tyto molekuly působí. Princip hydrofilní membrány spočívá v parciálních tlacích nasycených par, kdy se vodní páry protlačují skrz membránu ven.

Pro výrobní řadu Dermizax Der 001 jsou například garantovány vlastnosti membrány přes 20 000 mm vodního sloupce a pro parapropustnost dvouvrstvé laminace 10,000 g/m²/24 hod [2, 21].



Obr. 10 ukázka voděodolného a parapropustného mechanismu u výrobků Dermizax [21]

2.3 Typy laminátů

Dosud nejrozšířenější technologie pro zlepšení odolnosti proti poškození membrány je technologie laminování neboli aplikace membrány na textilii. Laminování je spojení dvou a více vrstev, přičemž se povrch jedné textilie spojí ke druhé textilii a dochází k pevnému spoji. Způsob výroby spočívá ve spojování jednotlivých vrstev lepením nebo tavením a laminaci lze provádět ručně nebo na speciálních strojích. Mezi typická pojiva patří např. organosoly PVC, polyamidové pasty nebo polyuretanová pěna. Nanášejí se buď na celou plochu textilie, nebo bodově [12, 13].

Laminace membrán se rozděluje do pěti skupin:

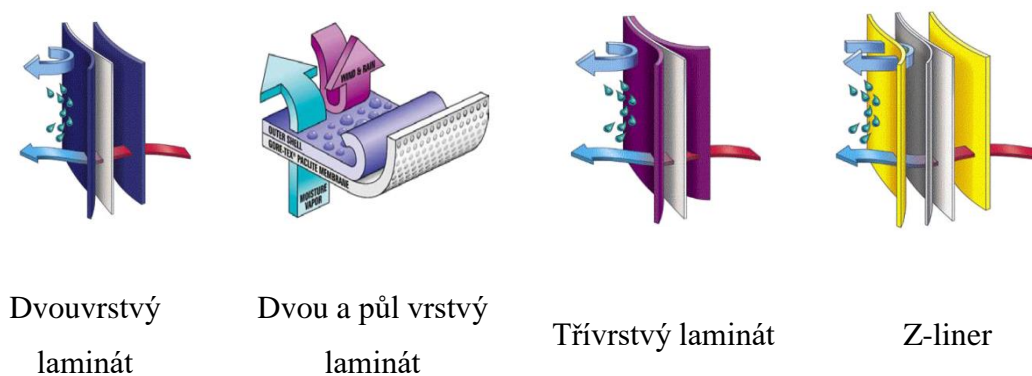
Dvouvrstvý laminát (vrchní látka + membrána) – membrána není v podstatě chráněná a dochází díky tření k jejímu poškození.

Dvouvrstvý laminát s volnou podšívkou (vrchní látka + membrána + volná podšívka) – mezi laminátem a volnou podšívkou dochází ke tření a k následnému poškození membrány. Parapropustnost je také horší z důvodu vzduchu mezi podšívkou a membránou.

Dvou a půlvrstvý laminát (vrchní látka + membrána + půl vrstva) - membrána je laminována na vrchní látku a ze spodu je zpevněna krycí vrstvou. Konečné produkty se vyznačují měkkostí, prodyšností a lehkostí.

Třívrstvý laminát (vrchní látka + membrána + podšívka) - vnější tkanina, membrána a podšívka tvoří slaminovaný kompaktní celek. Jde o mechanicky nejvíce odolnou kombinaci pro extrémní použití s většinou pevnějšími a méně poddajnými materiály a výrobci dosahují dobrých hodnot v parapropustnosti.

Volně vložená membrána (Z-liner) – nejedná se o laminát, protože membrána je volně vložena mezi podšívku a vrchní materiál a nejvíce se tato technologie využívá u rukavic z důvodu ohybové tuhosti [2, 14, 15, 16].



Obr. 11 Vizuální příklady laminací membrán [3]

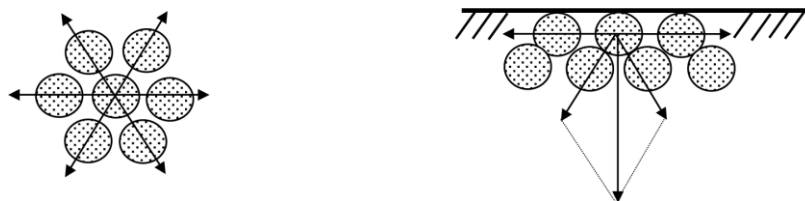
2.4 Finální úpravy textilií

Hydrofobní úprava patří mezi ochranné finální úpravy. Snižuje smáčivost a zároveň jí poskytuje vodoodpudivost (odperlující efekt). Hydrofobizací se na textilií vytvoří film, který svou elasticitou a uzavřením pomocí orientovaného uspořádání molekul zamezuje vniknutí vody.

Většina materiálů využívaných pro outdoorové oblečení je již při výrobě upravována vodoodpudivými prostředky a takové materiály se označují jako DWR („Durable Water Repellent“), neboli trvanlivě vodě odpudivé. Ovšem nanosená hydrofobní vrstva po několika práních ztratí svůj účinek.

Aby se textilní materiály snadněji smáčely, používají se různé smáčecí prostředky, které snižují povrchové napětí mezi ovzduším, pracím roztokem a textilním materiálem, přičemž každá povrchově aktivní látka má optimální smáčivost jen v určité koncentraci a při určité teplotě.

Povrchové napětí mezi prací kapalinou a vzduchem se tvoří vtahováním molekul z povrchu dovnitř kapaliny, vzniká tedy v povrchové vrstvě kapaliny působením kohezních sil, tj. vzájemných přitažlivých sil mezi molekulami.

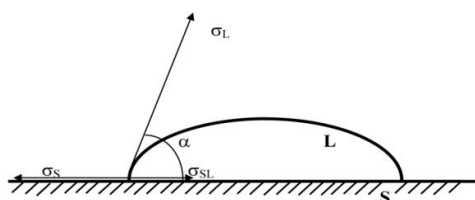


Obr. 12 Molekuly uvnitř kapaliny (vlevo) a molekuly na povrchu kapaliny (vpravo)

Působí-li molekuly v libovolném myšleném řezu povrchovou vrstvou na délce l tohoto řezu silou F , kolmou k řezu, je povrchové napětí σ určeno vztahem

$$\sigma = F \cdot l^{-1} \text{ [N.m}^{-1}\text{]} \quad (8)$$

O množství smáčení pevného povrchu substrátu kapalinou, rozhoduje velikost kontaktního (smáčecího) úhlu α , který je charakteristickou veličinou trojfázové soustavy pevná látka - kapalina - vzduch. Kapka ve styku s pevným povrchem zaujímá tudíž tvar, který je určen velikostí povrchového napětí pevného tělesa σ_S , Mezi povrchovým napětím kapaliny a pevného tělesa σ_{SL} a povrchovým napětím kapaliny σ_L .



Obr. 13 Znárodnění tvaru kapky kapaliny L na pevném povrchu S a směry povrchových a mezipovrchových sil [1]

Povrchové napětí je závislé na teplotě (se zvyšující se teplotou T klesá hodnota povrchového napětí σ). K dokonalému smočení je nutná povrchová aktivita smáčecích prostředků, která závisí na jejich účinnosti, koncentraci, hodnotě pH a teplotě lázně.

Materiály s touto úpravou se vyznačují dlouhodobou nesmáčivostí [24]. Voda po povrchu materiálu jednoduše steče v podobě drobných kapek, jako je to například u lotosového květu. Často také tento jev označujeme jako lotosový efekt [22].



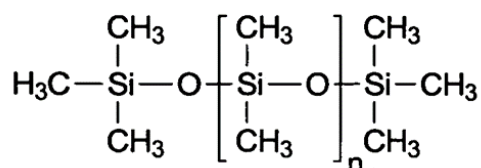
Obr. 14 Lotosový květ - Lotosový efekt [22]

Chemické látky a způsoby nánosování pro hydrofobní úpravu:

Hydrofobní úpravy na textilním zboží může být dosaženo použitím různých typů hydrofobních prostředků:

- parafinové emulze s hlinitými nebo zirkoničitými solemi,
- deriváty vyšších mastných kyselin,
- silikony,
- fluorkarbonové prostředky - perfluoralkany (oleofobní i hydrofobní úprava) [23].

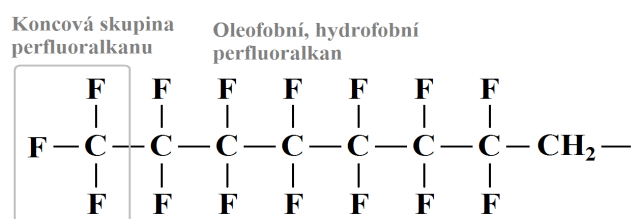
Hydrofobní prostředky na bázi polysiloxanů obsahují polysiloxanový řetězec, který vzniká polymerací hydrogenmethylpolysiloxanu nebo dimethylpolysiloxanu. Tyto hydrofobní prostředky jsou výborně filmotvorné díky jejich schopnosti se prostorově zesít'ovat. Pro polymeraci siloxanů se používají organické nebo anorganické katalyzátory, které ovlivňují i konečnou fixaci polysiloxanů. Hydrofobní účinek je založen na orientování methylových skupin (-CH₃) [23].



Obr. 15 Chemický vzorec silikonu

Fluorkarbonové přípravky

Tyto přípravky obsahují perfluorované alkylové skupiny. Na správnou funkci těchto prostředků má vliv délka řetězce ovlivňujícího vzdálenost skupiny – CF₃ od povrchu vlákna. Prostředky s dobrou účinností musí obsahovat perfluorovaný alkyl složený podle vzorce CF₃(CF₂)₆. Dobrá účinnost je dále ovlivněna koncentrací přípravku na textilií a správným postupem při sušení a fixaci [32].



Obr. 16 Chemický vzorec Perfluorovaný alkyl [5]

Úprava povrchu textilního materiálu perfluorkarbonovými prostředky zajišťuje snížení jeho povrchového napětí. Povrch textilního materiálu může být smáčen kapalinou pouze tehdy, má-li vyšší povrchové napětí než kapalina, a tím je zajišťována hydrofobní a oleofobní úprava textilních materiálů [5].

PŘEDSTAVENÍ NANOVLÁKENNÉ MEMBRÁNY NANOMEMBRANE

3. Nanovláknenná membrána

Nanovláknena se nepoužívají pouze v oblasti technických textilií, ale začínají nacházet své uplatnění i v oděvním průmyslu. Mají potenciál stát se součástí běžného života lidí. Dá se předpokládat možnost výroby funkčního oblečení z těchto vláken, ovšem za podmínky, že se v něm člověk bude cítit komfortně, což znamená, že musí splňovat tyto požadavky: omezení vlhkosti, dobře odvádět vodu, být příjemná na dotek, v létě chladit a v zimě hřát. Proto je nutné, aby zhotovené oděvní výrobky byly velmi paropropustné.

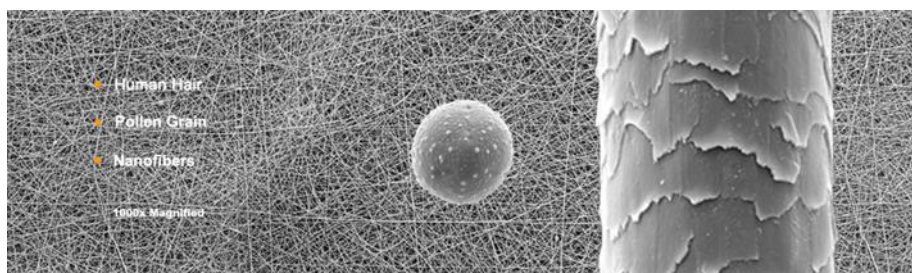
Díky nanovláknenné struktuře mají podle společnosti Nanoprotex tyto membrány o 25 % více pórů než porézní membrány. Odkazují se na velkou paropropustnost dvouvrstvého laminátu (2L) začíná už od Ret 0,89 [Pa.m²/W] [2].

3.1 Nanovláknena

Za materiály budoucnosti, které by mohly splňovat termofyziologický komfort, jsou označována nanovláknena. Ta by mohla přinést převrat v oblasti elektroniky, medicíny, automobilového průmyslu, filtračních procesů, ochraně životního prostředí, nano-kompozitech, energii, IT, ochranných pomůckách a další.

Nanovláknena jsou definována jako vlákna s průměrem menším než 100 nanometrů. Podle americké společnosti SNS Nano Fibre Technology je nanovlákneno definované jako vlákno s průměrem menším než 1 mikrometr [36]. Jako surovina se dá použít asi 50 syntetických a přírodních polymerů. Jako textilie se nanovláknena zatím zpracovávají jen ve formě netkaných textilií. Díky svým jedinečným vlastnostem přináší výroba nanovláken zcela unikátní příležitosti pro uplatnění nanovláknenných materiálů v různých aplikacích. Mezi vlastnosti nanovláken patří obrovský měrný povrch (tisícinásobně větší, než například mikrovlákneno) a vynikající mechanické vlastnosti v poměru k jejich hmotnosti [33].

Nanovláknena se vyrábějí z polymerů a procesem, který se nazývá electrospinning (elektrostatické zvláknování).

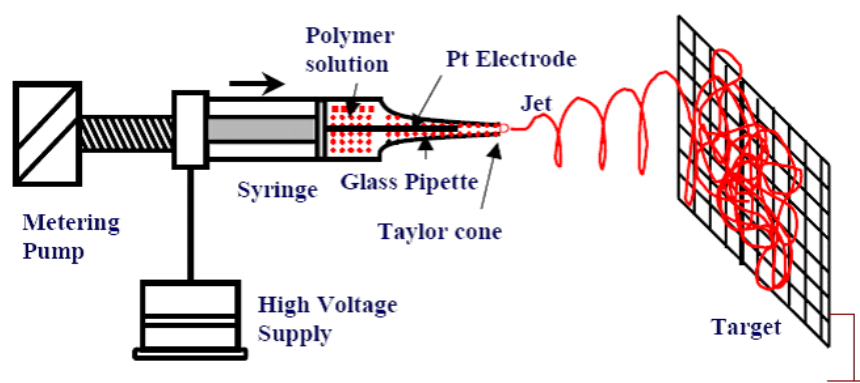


Obr. 17 Porovnání nanovláken s vlasem a pylovým zrnkem [33]

3.2 Elektrostatické zvlákňování

Základním principem elektrostatického zvlákňování - je tvorba nanovláken, založená na natahování viskoelastického proudu roztoku zvláknitelného polymeru.

Při elektrostatickém zvlákňování dochází k formování polymerních roztoků nebo tavenin účinkem elektrostatického pole o vysokém stejnosměrném napětí. V povrchové vrstvě zvlákňovaného roztoku nebo taveniny polymeru se indukují elektrický náboj. Vlivem elektrického pole dojde na hladině k tvorbě Taylorových kuželů (je překonáno povrchové napětí kapaliny), které jsou elektrostatickou silou přitahovány k proti elektrodě. Cestou vlákna tuhne a tvoří vláknennou vrstvu na podkladovém materiálu pohybujícím se po povrchu protielektrody [26, 34].



Obr. 18 Schéma elektrostatického zvlákňování [26]

3.2.1 Zvlákňovací zařízení Nanospider

Zařízení Nanospider, který byl vyvinut Technickou univerzitou v Liberci, Fakultou textilní - Katedra netkaných textilií, na rozdíl od ostatních metod nepoužívá žádných trysek ani kapilár pro tvorbu vláken, ale válec, který se otáčí kolem své osy

a přitom se na jeho povrchu vytváří tenký film roztoku polymeru, do kterého je částečně ponořený. V horní úvrati rotačního pohybu válce se v důsledku maximální intenzity elektrického pole začnou vytvářet mnohačetná ohniska Taylorových kuželů, která následně vyústí v proces zvlákňování. Kužele a proudy hmoty jsou vytvářeny v husté síti pokrývající horní část válce. Proudů roztoku polymeru jsou poté zbaveny rozpouštědla a stávají se pevnými nanovláknými těsně před tím, než dosáhnou kolektoru. Zařízení je průmyslově využitelné a dosahuje vysokého zvlákňovacího výkonu. Takto vyrobené vláknenné vrstvy jsou mnohostranně využitelné [27].

3.3 Ochranné finální úpravy nanovláknenných membrán

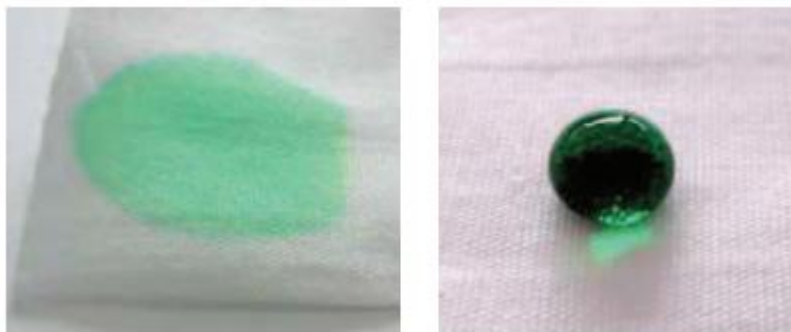
Na povrch nanovláknenné membrány Nanomembrane je nanosená tenká vrstvička nanočástic pomocí technologie finálních úprav - plazmy. Tato vrstvička vytvoří tzv. lotosový efekt, který pak zabraňuje znečištění pórů. Tato technologie se používá i na vrchní tkaniny a pleteniny, ke kterým je nanovláknenná membrána nalaminována. Výsledný efekt je ten, že nanovláknenná membrána je na povrchu vysoce hydrofobní, ale navíc je i vysoce oleofobní [35].

3.3.1 Technologie finální úpravy nanovláknenné membrány – plazma

Plazma je kvazineutrální soubor částic s volnými nosiči nábojů, který vykazuje kolektivní chování. Je to ionizovaný plyn, který se skládá z kladných a záporných iontů, elektronů, stejně jako volných radikálů. Ionizační stupeň se může měnit od 100 % (plně ionizovaných plynů) až po velmi nízké hodnoty (částečně ionizované plyny). Energeticky bohaté ionty a elektrony jsou vytvořeny společně s dalšími reaktivními částicemi a mohou tak působit na povrch velmi efektivně [2].

Aplikace plazmatických povrchových úprav na bázi fluorouhlíku umožňuje snížení špinivosti, smáčivosti, hořlavosti nebo naopak zvýšení savosti a prodyšnosti, dále také zvyšování jejich funkčnosti materiálu a zlepšování užitečných vlastností.

V tomto případě byl použit fluorouhlík, který působí také oleofobně. Proces technologie je takový, že membrána je ošetřena plazmou za působení fluorouhlíku. Ta v komoře při určité teplotě, tlaku, frekvenci, výkonu a času a za působení fluorovaných uhlovodíků způsobí, že je povrch textilie povrstven [25, 29].



Obr. 19 Vlevo neošetřená bavlněná textilie, vpravo plazmou ošetřená hydrofobní bavlněná textilie [25]

Pro aplikace, které mají pracovat s extrémně tenkými a pružnými textiliemi, jako jsou nanovlákněné textilie, byla vyvinuta platforma, která je energeticky efektivnější než jiné komerční výrobní procesy, tzv. Roll-to-roll (R2R), při které proces povrchových úprav – povrstvení nanovlákněné membrány v plazmě probíhá za vysokého výkonu, nízkých nákladů a nízkého dopadu na životní prostředí. Role nanovlákněné membrány se odvíjí do systému, kde se skrz plazmu v komoře povrství nanočásticemi fluoruhlíkem a povrstvená textilie je navíjena zpět na válec [26, 28, 29].

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4. Analýza nanovláknenných membrán

V experimentální části jsou představeny vzorky, jejich vlastnosti a důležité fáze přípravy na provedení experimentů a analýzu naměřených dat.

Cílem experimentu bylo provést měření nanovláknenného materiálu s rozdílnou plošnou hmotností, propustností textilie pro vzduch neboli prodyšností, propustností pro vodní páry (paropropustností) a výšky vodního sloupce (hydrostatické odolnosti). Všechna měření, která jsou uvedena v této práci, proběhla v laboratořích na Katedře hodnocení textilií Technické univerzity v Liberci a měření proběhla pouze na vzorcích nanovláknenné vrstvy - membrány.

Vzorky byly poskytnuty společností Nanomebrane.

4.1 Charakterizace vzorků

Vzorky byly poskytnuty společností Nanomembrane, která vznikla v roce 2015 a jako první na světě začala průmyslově vyrábět nanovláknennou membránu s průměrem vláken pod 150 nm ve spolupráci se společností Svitap a s Fakultou textilní, Technickou univerzitou v Liberci [30]. Jejich produkty, nanovláknenné membrány, garantují zákazníkům vynikající vlastnosti, mezi něž patří extrémně vysoká paropropustnost, voděodolnost s vysokým vodním sloupcem a 100% větruodolnost. Tento materiál je vhodný zejména pro outdoorové, sportovní a armádní účely [31].

Pro experiment v této práci bylo vybráno a porovnáno celkem devět mikroporézních hydrofóbních nanovláknenných vrstev, které se od sebe lišily plošnou hmotností. Jejich plošná hmotnost byla v rozmezí od 1 g/m² až 5 g/m². Všechny vzorky byly vyrobené z polyamidu 6 (PA 6) pomocí technologie Nanospider™, zařízení na výrobu nanovláken od společnosti Elmarco. Vzorky byly ošetřeny fluorouhlíkem a plazmou. Pro zpevnění testovaného materiálu byla použita podkladová netkaná textilie vyrobená technologií Spunlace.

Vzorky s plošnou hmotností od 1 do 5 g/m² byly označeny podle jejich plošné hmotnosti, která se navyšovala o 0,5 g/m², tzn. Vzorek 1 má 1 g/m², Vzorek 1,5 má 1,5 g/m², atd. Celkem bylo měřeno devět vzorků.

Pro potřebnou analýzu vzorků bylo v zadání změřit plošnou hmotnost, prodyšnost, paraproustnost, hydrostatickou odolnost a obrazovou analýzu - pořovitost.

Pro hodnocení vzorků byla použita popisná statistika.

Popisná statistika

Byly používány tyto vzorečky, které vyhovují v dané situaci. Byl použit kvantil studentova rozdělení, jelikož je známa pouze výběrová směrodatná odchylka.

$$\text{Střední hodnota:} \quad \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (9)$$

$$\text{Výběrová směrodatná odchylka:} \quad s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (10)$$

$$\text{Variační koeficient:} \quad V = \frac{s}{\bar{x}} \quad (11)$$

$$\text{Pološířka intervalu spolehlivosti:} \quad \Delta = \frac{s}{\sqrt{n}} t_{n-1} \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \quad (12)$$

$$\text{Horní mez oboustranného intervalu spolehlivosti:} \quad T_H = \bar{x} + \Delta \quad (13)$$

$$\text{Dolní mez oboustranného intervalu spolehlivosti:} \quad T_H = \bar{x} - \Delta \quad (14)$$

n ... počet měření

x_i i -tá změřená hodnota

$t_{n-1} \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)$... kvantil studentova rozdělení s stupni volnosti

α ... hladina významnosti, definuje pravděpodobnost intervalu spolehlivosti

4.2 Plošná hmotnost

Plošná hmotnost vyjadřuje hmotnost textilie na jednotku plochy.

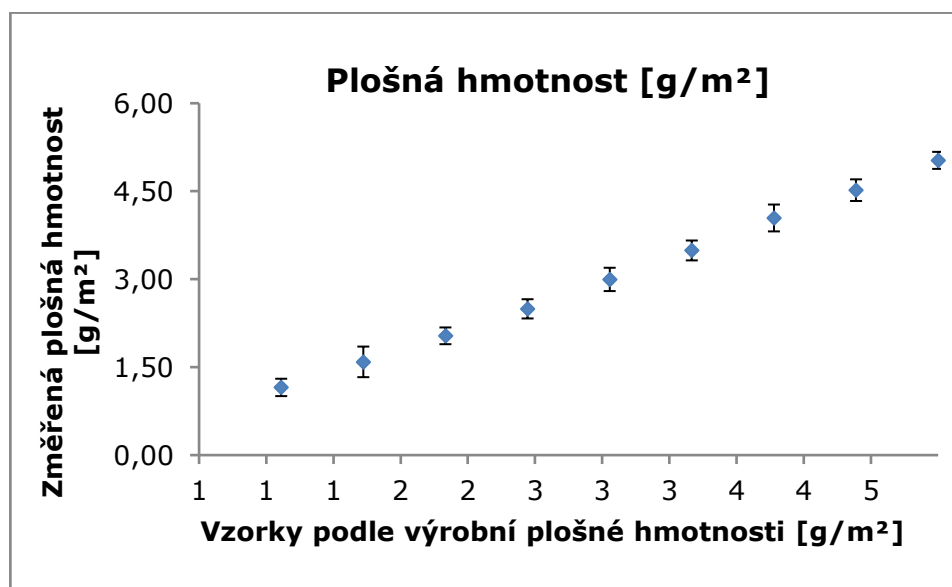
$$M = \frac{m \text{ (hmotnost)}}{S \text{ (plocha textilie)}} [\text{g/m}^2] \quad (15)$$

Vážení plošné hmotnosti bylo provedeno v laboratoři na Katedře netkaných textilií na digitální váze RADWAG AS 220/C/2 s dílkem 0,001 g. Od každého materiálu s rozdílnou plošnou hmotností bylo nastříháno pět vzorků o rozměru 100 x 100 mm. Vážení vzorků probíhalo s podkladovou textilií a následně se odstranila nanovlákněná membrána a vzorek se zvažil podruhé bez nanovlákněné membrány, aby se pak po odečtení hodnot zjistila plošná hmotnost nanovlákněného materiálu. Naměřené hodnoty

vzorků pak posloužily k analýze popisné statistiky hmotnosti. Naměřená data byla vyhodnocena pomocí tabulkovým procesorem Excel a výsledky jsou uvedeny níže v tabulce 1, naměřená data jsou součástí přílohy A.

Tab. 1 Popisná statistika plošné hmotnosti

| Vzorky: | Střední hodnota | Výběrová směrodatná odchylka | Variační koeficient | Pološířka intervalu spolehlivosti | 95% Interval spolehlivosti | |
|------------|---------------------|------------------------------|---------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | [g/m ²] | [g/m ²] | [-] | [g/m ²] | dolní mez [g/m ²] | horní mez [g/m ²] |
| Vzorek 1 | 1,15 | 0,12 | 0,103 | 0,15 | 1,01 | 1,30 |
| Vzorek 1,5 | 1,59 | 0,21 | 0,132 | 0,26 | 1,33 | 1,85 |
| Vzorek 2 | 2,03 | 0,12 | 0,057 | 0,14 | 1,89 | 2,18 |
| Vzorek 2,5 | 2,49 | 0,13 | 0,053 | 0,16 | 2,33 | 2,66 |
| Vzorek 3 | 3,00 | 0,16 | 0,053 | 0,20 | 2,80 | 3,19 |
| Vzorek 3,5 | 3,49 | 0,14 | 0,039 | 0,17 | 3,32 | 3,66 |
| Vzorek 4 | 4,04 | 0,18 | 0,046 | 0,23 | 3,81 | 4,27 |
| Vzorek 4,5 | 4,52 | 0,15 | 0,033 | 0,18 | 4,33 | 4,70 |
| Vzorek 5 | 5,03 | 0,12 | 0,023 | 0,14 | 4,88 | 5,17 |



Graf 1 Hodnocení závislosti vzorků na plošné hmotnosti

Analýza

Výrobní plošná hmotnost vzorků odpovídá naměřené plošnosti vzorků, neboli deklarované hodnoty výrobcem odpovídají naměřeným hodnotám. Nemá proto smysl zjišťovat typ závislosti.

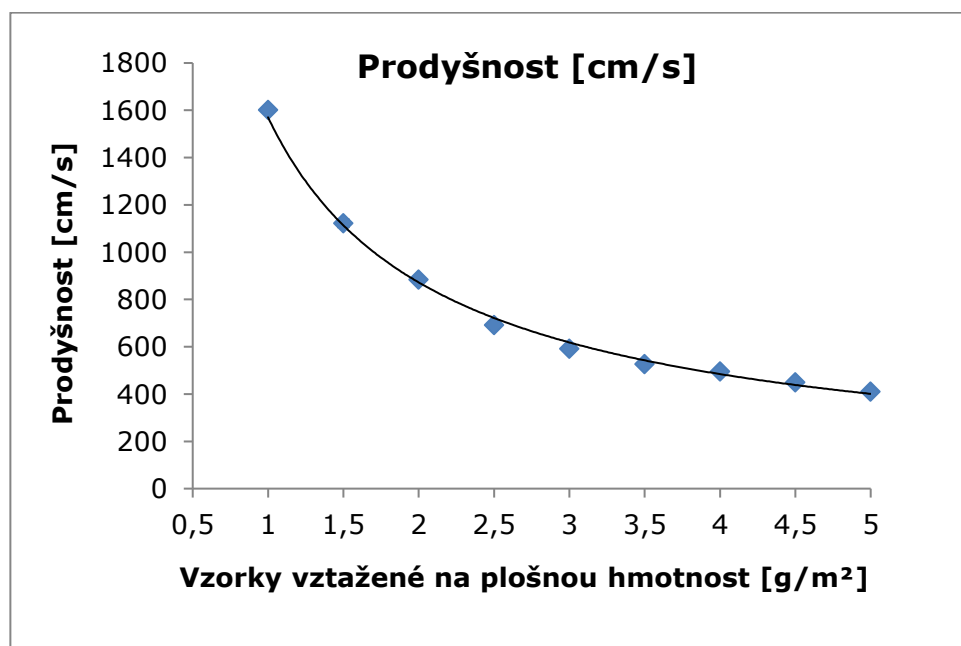
4.3 Prodyšnost

Měření probíhalo v souladu s normou ČSN EN ISO 9237 (80 0817): Textilie – Zjišťování prodyšnosti plošných textilií. Norma určuje metodu pro měření prodyšnosti pro většinu plošných textilií včetně netkaných textilií. [38] Podstata zkoušky spočívala dle normy - Měří se rychlost proudu vzduchu procházejícího kolmo danou plochou plošné textilie při stanoveném tlakovém spádu [5].

Měření prodyšnosti bylo provedeno na přístroji FX 3300 Air Permeability Tester firmy Textest AG dle doporučených zkušebních podmínek, při tlakovém spádu 100 Pa a s velikostí měřené plochy vzorku 20 cm². Podkladová netkaná textilie byla odstraněna a měřila se vzorek nanovlákněné membrány. Zkoušeno bylo pět nanovlákněných membrán od Vzorku 1 po Vzorek 5. Zkoušený vzorek se opatrně upnul mezi čelisti a tím se automaticky zapnul ventilátor. Vzorek se měřil pouze jednou, tzv. pro každý materiál bylo provedeno pět měření na odlišných místech textilie, tak aby se změřila různá místa nanovlákněné membrány. Hodnota prodyšnosti se po ustálení odečítala na displeji. Prodyšnost byla měřena v jednotkách [cm/s]. Naměřená data jsou součástí přílohy B.

Tab. 2 Popisná statistika naměřených dat prodyšnosti

| Vzorky: | Střední hodnota | Výběrová směrodatná odchylka | Variační koeficient | Pološířka intervalu spolehlivosti | 95% Interval spolehlivosti | |
|-------------------|-----------------|------------------------------|---------------------|-----------------------------------|----------------------------|------------------|
| | [cm/s] | [cm/s] | [-] | [cm/s] | dolní mez [cm/s] | horní mez [cm/s] |
| Vzorek 1 | 1602,0 | 8,4 | 0,005 | 10,4 | 1591,6 | 1612,4 |
| Vzorek 1,5 | 1122,0 | 13,0 | 0,012 | 16,2 | 1105,8 | 1138,2 |
| Vzorek 2 | 884,2 | 2,9 | 0,003 | 3,7 | 880,5 | 887,9 |
| Vzorek 2,5 | 692,2 | 7,0 | 0,010 | 8,7 | 683,5 | 700,9 |
| Vzorek 3 | 592,0 | 1,2 | 0,002 | 1,5 | 590,5 | 593,5 |
| Vzorek 3,5 | 526,6 | 1,5 | 0,003 | 1,9 | 524,7 | 528,5 |
| Vzorek 4 | 496,0 | 7,4 | 0,015 | 9,2 | 486,8 | 505,2 |
| Vzorek 4,5 | 449,4 | 1,9 | 0,004 | 2,4 | 447,0 | 451,8 |
| Vzorek 5 | 411,2 | 1,3 | 0,003 | 1,6 | 409,6 | 412,8 |



Graf 2 Hodnocení hodnot prodyšnosti vzorků

Analýza

Hodnoty v tabulce 2, následné vyhodnocení hodnot v grafu 2 nám ukazuje, že při vzrůstající plošné hmotnosti prodyšnost přes nanovláknou membránu klesá. Vzorek 1 vykazuje nejvyšší hodnotu prodyšnosti 1 602 [cm/s] oproti ostatním vzorkům. Zatímco vzorek 5 vykazuje pouze 411 cm/s neboli nejnižší hodnotu prodyšnosti. S rostoucí plošnou hmotností nanovlákné vrstvy se prodyšnost snižuje. Variační koeficient je u všech vzorků velmi nízký, a proto měření probíhalo s vysokou relativní přesností.

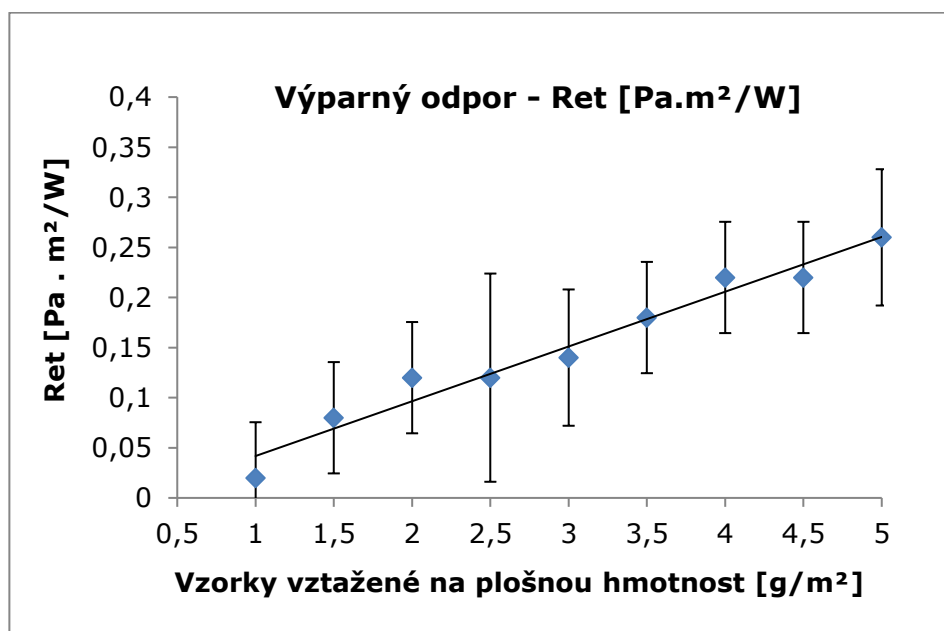
4.4 Paropropustnost

Propustnost textilií pro vodní páry se hodnotí prostřednictvím výparného odporu R_{et} a relativní propustnosti pro vodní páry bylo provedeno na přístroji Permetest.

Vzorky byly přikládány na měřicí hlavici (Skin model) a následně byly zavlhčovány. Pomocí elektrické topné spirály a regulátoru byly vzorky udržovány na teplotě okolního vzduchu (24 °C), který byl do přístroje nasáván. Tím byly zajištěny izotermické podmínky měření. Vlhkost procházela přes separační fólii skrz vložené vzorky, které byly z vnitřní strany zvlhčovány a z vnější strany ofukovány. Simulovala se funkce ochlazování pocením. Příslušný výparný tepelný tok byl měřen speciálním snímačem a jeho hodnota je přímo úměrná paropropustnosti textilie nebo nepřímo úměrná jejímu výparnému odporu. Nejdříve byl měřen tepelný tok bez vzorku a poté znovu se vzorkem. Přístroj registruje odpovídající tepelné toky q_0 (plošná hustota tepelného toku procházející měřicí hlavici nezakrytou měřeným vzorkem) a q_v (plošná hustota tepelného toku procházející měřicí hlavici zakrytou měřeným vzorkem). U měřených hodnot R_{et} v jednotkách $\text{Pa}\cdot\text{M}^2/\text{W}$ platí, že čím menší hodnota, tím lépe. R_{et} hodnotí dle normy ISO 11092 energii, která je vyvinuta, aby se odpařilo konkrétní množství vody za dané teploty a vlhkosti vzduchu. Lepší pro nás je nižší R_{et} , tedy, že je třeba menší energie. Naměřená data jsou součástí přílohy C.

Tab. 3 Popisná statistika naměřených dat výparného odporu

| Vzorky: | Střední hodnota | Výběrová směrodatná odchylka | Variační koeficient | Pološířka intervalu spolehlivosti | 95% Interval spolehlivosti | |
|------------|------------------------|------------------------------|---------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | [Pa.m ² /W] | [Pa.m ² /W] | [-] | [Pa.m ² /W] | dolní mez [Pa.m ² /W] | horní mez [Pa.m ² /W] |
| Vzorek 1 | 0,020 | 0,045 | 2,236 | 0,056 | -0,036 | 0,076 |
| Vzorek 1,5 | 0,080 | 0,045 | 0,559 | 0,056 | 0,024 | 0,136 |
| Vzorek 2 | 0,120 | 0,045 | 0,373 | 0,056 | 0,064 | 0,176 |
| Vzorek 2,5 | 0,120 | 0,084 | 0,697 | 0,104 | 0,016 | 0,224 |
| Vzorek 3 | 0,140 | 0,055 | 0,391 | 0,068 | 0,072 | 0,208 |
| Vzorek 3,5 | 0,180 | 0,045 | 0,248 | 0,056 | 0,124 | 0,236 |
| Vzorek 4 | 0,220 | 0,045 | 0,203 | 0,056 | 0,164 | 0,276 |
| Vzorek 4,5 | 0,220 | 0,045 | 0,203 | 0,056 | 0,164 | 0,276 |
| Vzorek 5 | 0,260 | 0,055 | 0,211 | 0,068 | 0,192 | 0,328 |



Graf 3 Vyhodnocení hodnot výparného odporu

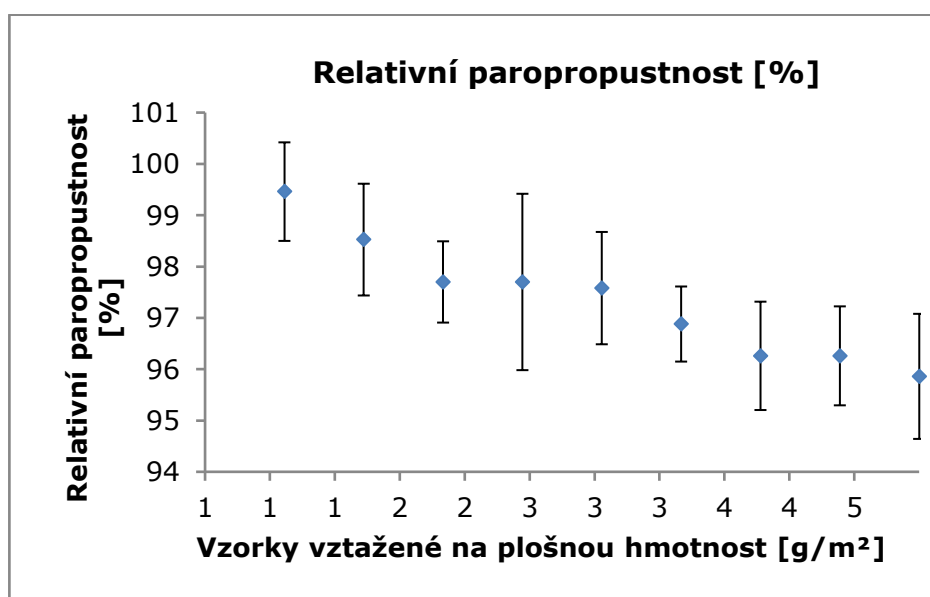
Analýza

Z tabulky 3 a grafu 3 je zřejmé, že s rostoucí plošnou hmotností se výparný odpor zvyšuje přibližně lineárně. Variační koeficient u Vzorku 1 má větší hodnotu než 2, protože střední hodnota je téměř nulová. U vzorků s malou plošnou hmotností byl výparný odpor roven téměř nule, takže to způsobilo vysokou relativní chybu, kdy variační koeficient se zvyšující se plošnou hmotností se snižoval.

Dle Klasifikace propustnosti pro vodní páry dle stávající normy ISO 11092 vykazovaly všechny vzorky velmi dobrou hodnotu výparného odporu ($Ret < 6$ – velmi dobré). Zde je nutno podotknout, že nanovláknenné membrány skutečně vykazují extrémně vysokou parapropustnost, neboli schopnosti odvádět tělesnou vlhkost od pokožky člověka do vnějšího prostředí. Naměřená data jsou součástí přílohy C.

Tab. 4 Popisná statistika hodnot relativní parapropustnosti

| Vzorky: | Střední hodnota | Výběrová směrodatná odchylka | Variační koeficient | Pološířka intervalu spolehlivosti | 95% Interval spolehlivosti | |
|------------|-----------------|------------------------------|---------------------|-----------------------------------|----------------------------|---------------|
| | [%] | [%] | [-] | [%] | dolní mez [%] | horní mez [%] |
| Vzorek 1 | 99,460 | 0,773 | 0,008 | 0,960 | 98,500 | 100,420 |
| Vzorek 1,5 | 98,525 | 0,877 | 0,009 | 1,089 | 97,436 | 99,614 |
| Vzorek 2 | 97,700 | 0,638 | 0,007 | 0,792 | 96,908 | 98,492 |
| Vzorek 2,5 | 97,700 | 1,384 | 0,014 | 1,718 | 95,982 | 99,418 |
| Vzorek 3 | 97,580 | 0,881 | 0,009 | 1,094 | 96,486 | 98,674 |
| Vzorek 3,5 | 96,880 | 0,589 | 0,006 | 0,731 | 96,149 | 97,611 |
| Vzorek 4 | 96,260 | 0,850 | 0,009 | 1,056 | 95,204 | 97,316 |
| Vzorek 4,5 | 96,260 | 0,777 | 0,008 | 0,964 | 95,296 | 97,224 |
| Vzorek 5 | 95,860 | 0,981 | 0,010 | 1,218 | 94,642 | 97,078 |



Graf 4 Vyhodnocení hodnot relativní parapropustnosti

Analýza

Se vzrůstající plošnou hmotností paropropustnost klesá. Průměrný variační koeficient vzorků je menší než 0,01, což znamená poměrně dobrou relativní přesnost.

Při měření by se měly hodnoty relativní paropropustnosti a výparného odporu doplňovat.

Čím větší je hodnota relativní paropropustnosti, tím menší je hodnota výparného odporu. V případě analýzy z tabulky 3 a 4 a z grafu 3 a 4 je tato charakteristika splněna.

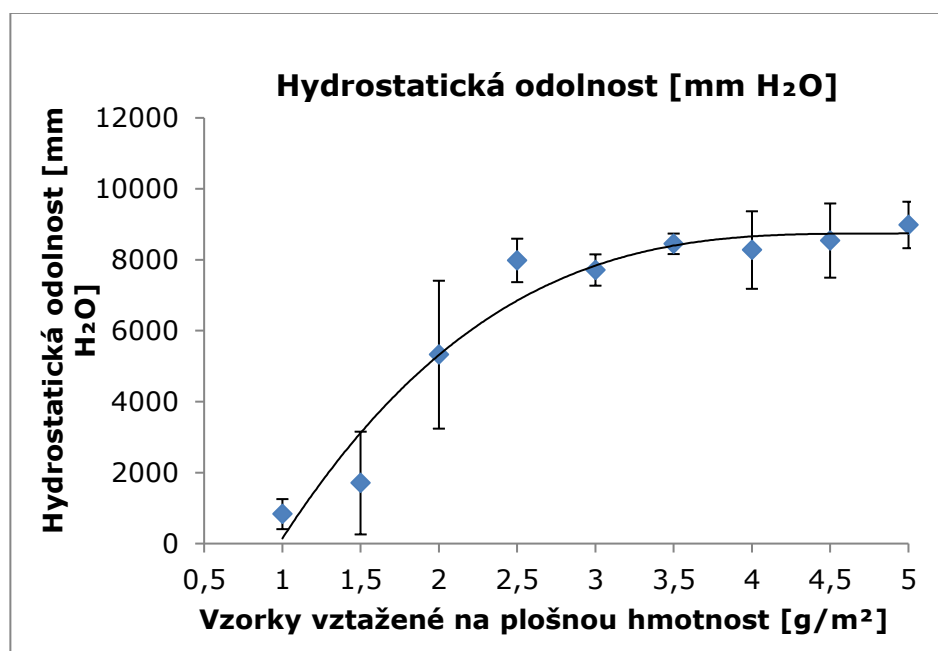
4.5 Hydrostatická odolnost

Měření hydrostatické odolnosti v této práci podléhá normě ČSN EN 20 811 (80 0818): Textilie – Stanovení odolnosti proti pronikání vody – Zkouška tlakem vody. Vzorek je vystaven trvale vzrůstajícímu tlaku vody na jednu svoji stranu tak dlouho, dokud nedojde k proniknutí vody na třech místech vzorku.

Měření pro účely této bakalářské práce byla provedena na přístroji Hydrostatic head tester - M018 společnosti SDL Atlas. U přístroje je potřeba nastavit rychlost nárůstu tlaku vodního sloupce. Pro měření byl zvolen nárůst tlaku 60 cmH₂O/min. Přístroj na svém displeji zobrazuje výšku vodního sloupce v jednotkách cmH₂O/min, dále rychlost nárůstu tlaku a čas, za který se dané výšky sloupce dosáhlo. Při měření byla přes testovaný vzorek nanovlákněné vrstvy umístěna nylonová síťka zajišťující jeho zpevnění proti protržení či deformaci. Voda je vytlačována stlačeným vzduchem a působí svým tlakem na plochu zkoušeného vzorku. Tento tlak je automaticky regulovaný dle nastavené rychlosti jeho nárůstu. Vlivem tlaku vody se začne vzorek napínat a měření probíhá do doby, než se na jeho povrchu objeví první tři kapky kapaliny - vody nebo dojde k jeho destrukci. V tomto okamžiku je měření zastaveno a je zaznamenána výška vodního sloupce. Naměřená data jsou součástí přílohy D.

Tab. 5 Popisná statistika naměřených dat hydrostatické odolnosti

| Vzorky: | Střední hodnota | Výběrová směrodatná odchylka | Variační koeficient | Pološířka intervalu spolehlivosti | 95% Interval spolehlivosti | |
|------------|-----------------------|------------------------------|---------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | [mm H ₂ O] | [mm H ₂ O] | [-] | [mm H ₂ O] | dolní mez [mm H ₂ O] | horní mez [mm H ₂ O] |
| Vzorek 1 | 830 | 341 | 0,411 | 424 | 406 | 1254 |
| Vzorek 1,5 | 1706 | 1018 | 0,597 | 1448 | 258 | 3154 |
| Vzorek 2 | 5324 | 1679 | 0,315 | 2084 | 3240 | 7409 |
| Vzorek 2,5 | 7981 | 493 | 0,062 | 612 | 7369 | 8594 |
| Vzorek 3 | 7711 | 355 | 0,046 | 441 | 7270 | 8152 |
| Vzorek 3,5 | 8450 | 232 | 0,028 | 289 | 8161 | 8738 |
| Vzorek 4 | 8274 | 880 | 0,106 | 1093 | 7181 | 9367 |
| Vzorek 4,5 | 8541 | 842 | 0,099 | 1046 | 7495 | 9587 |
| Vzorek 5 | 8981 | 527 | 0,059 | 655 | 8326 | 9636 |



Graf 5 Vyhodnocení hodnot hydrostatické odolnosti

Analýza

Nejvyšší hodnotu vodního sloupce prokázal Vzorek 5, zatímco nejnižší hodnotu prokázal Vzorek 1. Z grafu je zřejmé, že hydrostatická odolnost (výška vodního sloupce) poměrně rychle narůstá až do Vzorku 2,5, poté se ustálí na přibližně stejných hodnotách. Vzhledem k použití membrány na oděvy by bylo žádoucí, aby výška vodního sloupce byla co nejvyšší. Avšak pokud je materiál s hodnotou výšky vodního sloupce vyšší než 1 300 mm, pak lze membránu označit za nepromokavou. Potom už záleží na výrobcí, kam by nanovláknennou membránu s danou hodnotou vodního sloupce využil.

Pro budoucí analýzu by bylo zajímavé zjistit, jaká by byla hydrostatická odolnost se vzorky s vyšší plošnou hmotností, tzn. více než 5 g/m².

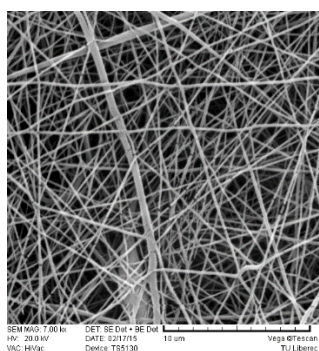
4.6 Obrazová analýza

Jinými slovy subjektivní posuzování obrazů pomocí objektivních charakteristik. Obrazová analýza mikroskopických snímků se zabývá získáváním kvantitativních informací o různých geometrických parametrech struktury materiálů. Podstatou této analýzy je digitalizace obrazu a zpracování vzniklého souboru v počítači.

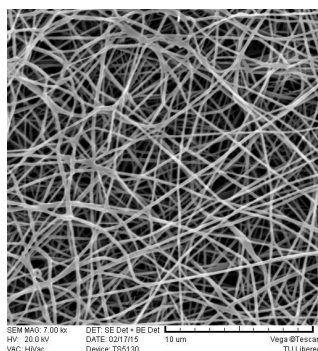
Snímky byly pořízeny v laboratoři Katedry textilních materiálů na rastrovacím elektronovém mikroskopu Vega TS 5130, který je počítačem řízený a je určen k pozorování povrchů při velkém zvětšení. Snímky pak mohou být předány k dalšímu počítačovému zpracování a následnému vyhodnocení.

K obrazové analýze bylo zapotřebí provést podélný řez u každé gramáže nanovláknenné membrány. Když byly vzorky nastříhány o přibližné velikosti 0,5 mm x 0,5 mm, následně byly pak vakuovány. Pak se vzorek vložil pod mikroskop a pořídil se snímek pro hodnocení textury. Prostřednictvím obrazové analýzy NIS-Elements 3.22 byly vyhodnoceny texturální charakteristiky, jako jsou počet pórů na danou plochu, ekvivalentní průměr pórů a Feretův průměr.

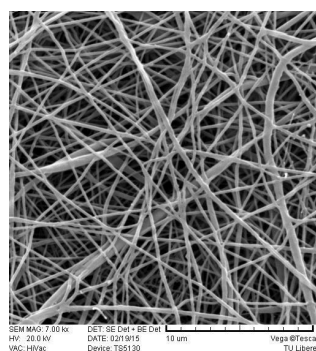
Struktura nanovláknenné membrány (měřítko 10 μm):



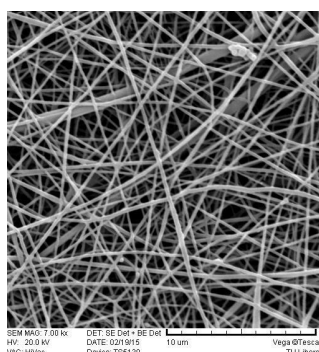
Vzorek 1



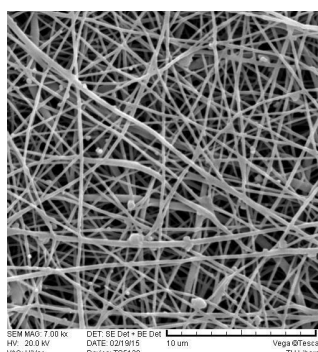
Vzorek 1,5



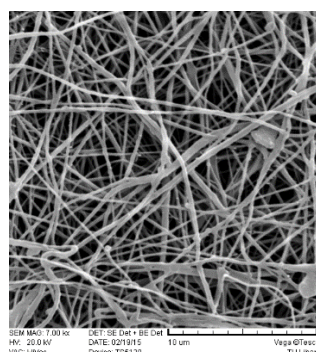
Vzorek 2



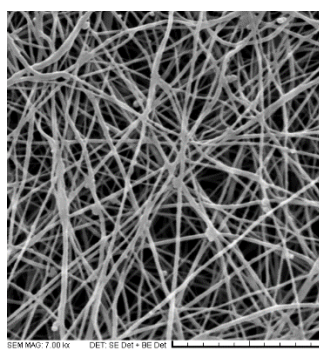
Vzorek 2,5



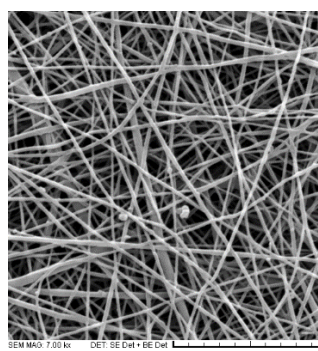
Vzorek 3



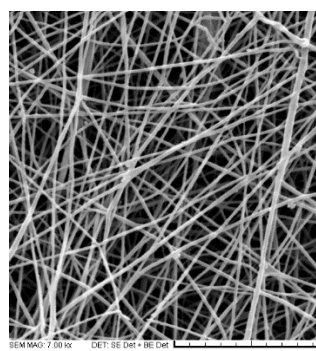
Vzorek 3,5



Vzorek 4



Vzorek 4,5



Vzorek 5

Obr. 20 Mikroskopické snímky vzorků

Větší snímky podélných a příčných řezů vzorků jsou pak součástí přílohy B.

4.6.1 Počet pórů na cm^2

Počet pórů se musel přepočítat z binární plochy na rozměrovou plochu vzorku, jak je znázorněno v tab. 6 níže. Střední hodnota počtu objektů se vynásobila střední

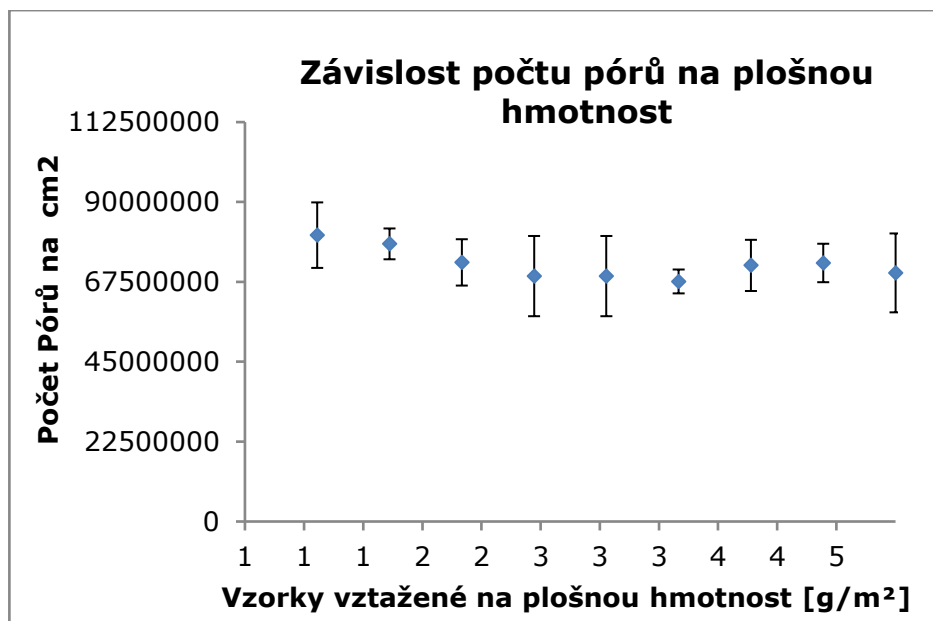
hodnotou části binární plochy a výsledek byl pak počet pórů v binární ploše. Binární plocha se pak převedla na plochu metrickou a vypočítal se počet pórů na 1 cm².

Tab. 6 Střední hodnoty počtu pórů v binárním poli a na cm².

| Vzorky: | Počet pórů v binárním poli | | | Počet pórů na cm ² |
|------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| | Střední hodnota počtu objektů (pórů) | Střední hodnota části binární plochy | Počet pórů v binární ploše | Střední hodnota |
| Vzorek 1 | 1338,8 | 0,241 | 322,65 | 80 662 700 |
| Vzorek 1,5 | 1167,2 | 0,268 | 312,81 | 78 202 400 |
| Vzorek 2 | 941,8 | 0,31 | 291,96 | 72 989 500 |
| Vzorek 2,5 | 909,6 | 0,304 | 276,52 | 69 129 600 |
| Vzorek 3 | 909,6 | 0,304 | 276,52 | 69 129 600 |
| Vzorek 3,5 | 913,8 | 0,296 | 270,48 | 67 621 200 |
| Vzorek 4 | 978,2 | 0,295 | 288,57 | 72 142 250 |
| Vzorek 4,5 | 952,0 | 0,306 | 291,31 | 72 828 000 |
| Vzorek 5 | 940,0 | 0,298 | 280,12 | 70 030 000 |

Tab. 7 Popisná statistika naměřených dat počtu pórů na cm².

| Vzorky: | Počet pórů na 1 cm ² | | | | | |
|------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | Střední hodnota | Výběrová směrodatná odchylka | Variační koeficient | Pološířka intervalu spolehlivosti | 95% Interval spolehlivosti dolní mez | 95% Interval spolehlivosti horní mez |
| Vzorek 1 | 80 662 700 | 7 429 428 | 0,092 | 9 224 852 | 71 437 847 | 89 887 552 |
| Vzorek 1,5 | 78 202 400 | 3 497 400 | 0,045 | 4 342 595 | 73 859 804 | 82 544 995 |
| Vzorek 2 | 72 989 500 | 5 254 500 | 0,072 | 6 524 323 | 66 465 176 | 79 513 823 |
| Vzorek 2,5 | 69 129 600 | 9 102 520 | 0,132 | 11 302 271 | 57 827 328 | 80 431 871 |
| Vzorek 3 | 69 129 600 | 9 102 520 | 0,132 | 11 302 271 | 57 827 328 | 80 431 871 |
| Vzorek 3,5 | 67 621 200 | 2 708 400 | 0,040 | 3 362 922 | 64 258 277 | 70 984 122 |
| Vzorek 4 | 72 142 250 | 5 805 600 | 0,080 | 7 208 604 | 64 933 645 | 79 350 854 |
| Vzorek 4,5 | 72 828 000 | 4 362 030 | 0,060 | 5 416 175 | 67 411 824 | 78 244 175 |
| Vzorek 5 | 70 030 000 | 8 950 430 | 0,128 | 11 113 426 | 58 916 573 | 81 143 426 |



Graf 6 Hodnocení počtu pórů pro jednotlivé vzorky z naměřených a vypočítaných dat.

Analýza

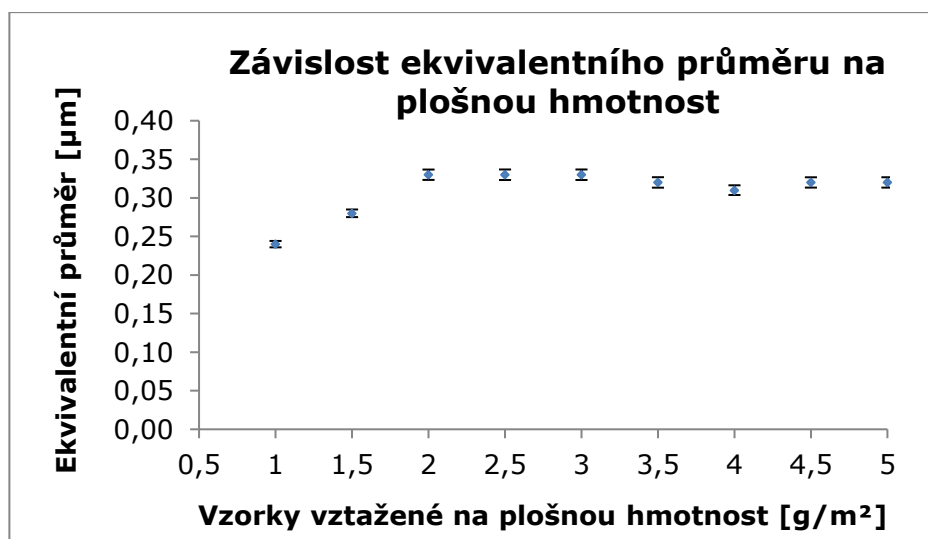
Nejvyšší počet pórů na cm² měl Vzorek 1 a nejmenší počet měl Vzorek 5. Z hodnocení je zřejmé, že se zvyšující plošnou hmotností mírně klesá počet pórů na cm².

4.6.2 Ekvivalentní a Feretův průměr

Ekvivalentní průměr je parametr, který se používá k charakterizaci pórů nepravidelného tvaru. Je roven průměru kruhu o stejné ploše, jako je plocha průmětu sledovaného póru.

Tab. 8 Popisná statistika ekvivalentních pórů

| Vzorky: | Střední hodnota | Výběrová směrodatná odchylka | Variační koeficient | Počet měřených objektů | Pološířka intervalu spolehlivosti | 95% Interval spolehlivosti | |
|------------|-------------------|------------------------------|---------------------|------------------------|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| | [μm] | [μm] | [-] | [-] | [μm] | Min [μm] | max [μm] |
| Vzorek 1 | 0,24 | 0,17 | 0,71 | 6486 | 0,004 | 0,236 | 0,244 |
| Vzorek 1,5 | 0,28 | 0,19 | 0,68 | 5672 | 0,005 | 0,275 | 0,285 |
| Vzorek 2 | 0,33 | 0,23 | 0,70 | 4518 | 0,007 | 0,323 | 0,337 |
| Vzorek 2,5 | 0,33 | 0,23 | 0,70 | 4387 | 0,007 | 0,323 | 0,337 |
| Vzorek 3 | 0,33 | 0,23 | 0,70 | 4387 | 0,007 | 0,323 | 0,337 |
| Vzorek 3,5 | 0,32 | 0,23 | 0,72 | 4415 | 0,007 | 0,313 | 0,327 |
| Vzorek 4 | 0,31 | 0,22 | 0,71 | 4690 | 0,006 | 0,304 | 0,316 |
| Vzorek 4,5 | 0,32 | 0,23 | 0,72 | 4573 | 0,007 | 0,313 | 0,327 |
| Vzorek 5 | 0,32 | 0,23 | 0,72 | 4520 | 0,007 | 0,313 | 0,327 |



Graf 7 Závislost ekvivalentního průměru na plošnou hmotnost

Analýza

Ekvivalentní průměr pórů byl nejmenší u Vzorku 1 (0,24 μm) a Vzorku 1,5 (0,28 μm), jinak vykazoval v podstatě stejnou hodnotu pro Vzorky 2 až 5. U vzorku 1 a 1,5 je zřejmé, že v rámci intervalu spolehlivosti dochází k vybočení z přibližně konstantní řady.

Maximální a minimální Feretův průměr

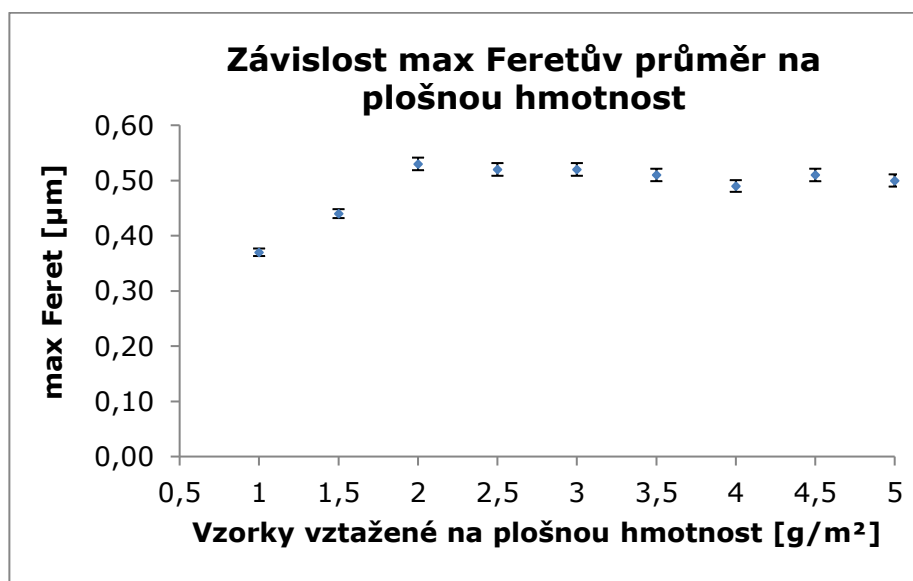
Je rozměr ve směru rotační osy (maximální Feretův průměr), neboli délka měřeného objektu a maximální rozměr kolmý k tomuto směru (minimální Feretův průměr), neboli šířka měřeného objektu. Měření Feretových průměrů bylo zvoleno z důvodu získání hodnot délky a šířky, neboť měřených objektů bylo velké množství a neměly pravidelný tvar.

Tab. 9 Maximální Feretův průměr

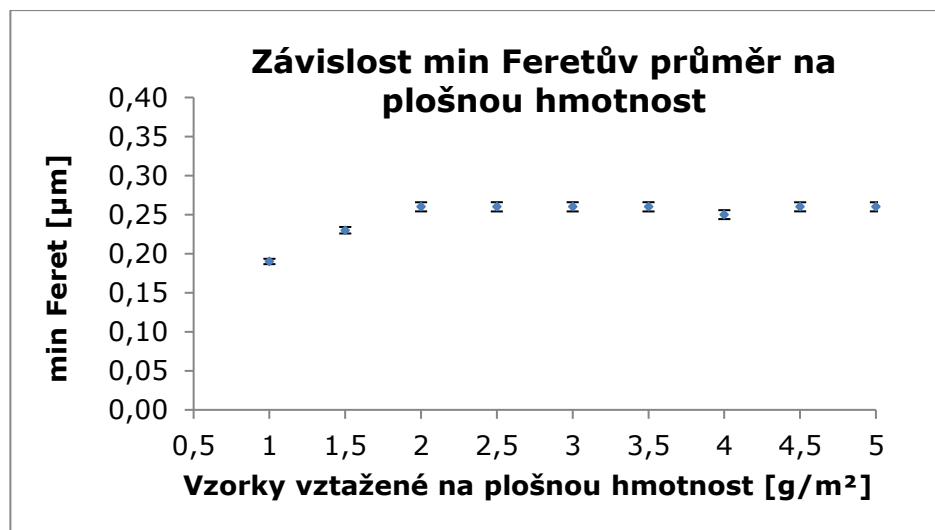
| Vzorky: | Maximální Feretův průměr | | | | | | |
|-------------------|--------------------------|------------------------------|---------------------|------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | Střední hodnota | Výběrová směrodatná odchylka | Variační koeficient | Počet měřených objektů | Pološířka intervalu spolehlivosti | 95% Interval spolehlivosti | |
| | [μm] | [μm] | [-] | [-] | [μm] | Dolní mez [μm] | Horní mez [μm] |
| Vzorek 1 | 0,37 | 0,28 | 0,76 | 6486 | 0,006 | 0,363 | 0,376 |
| Vzorek 1,5 | 0,44 | 0,31 | 0,70 | 5672 | 0,008 | 0,431 | 0,448 |
| Vzorek 2 | 0,53 | 0,39 | 0,74 | 4518 | 0,011 | 0,518 | 0,541 |
| Vzorek 2,5 | 0,52 | 0,39 | 0,75 | 4387 | 0,011 | 0,508 | 0,531 |
| Vzorek 3 | 0,52 | 0,39 | 0,75 | 4387 | 0,011 | 0,508 | 0,531 |
| Vzorek 3,5 | 0,51 | 0,38 | 0,75 | 4415 | 0,011 | 0,498 | 0,521 |
| Vzorek 4 | 0,49 | 0,37 | 0,76 | 4690 | 0,010 | 0,479 | 0,500 |
| Vzorek 4,5 | 0,51 | 0,39 | 0,76 | 4573 | 0,011 | 0,498 | 0,521 |
| Vzorek 5 | 0,50 | 0,38 | 0,76 | 4520 | 0,011 | 0,488 | 0,511 |

Tab. 10 Minimální Feretův průměr

| Vzorky: | Minimální Feretův průměr | | | | | | |
|------------|--------------------------|------------------------------|---------------------|------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | Střední hodnota | Výběrová směrodatná odchylka | Variační koeficient | Počet měřených objektů | pološírka intervalu spolehlivosti | 95% Interval spolehlivosti | |
| | [μm] | [μm] | [-] | [-] | [μm] | Dolní mez [μm] | Horní mez [μm] |
| Vzorek 1 | 0,19 | 0,14 | 0,74 | 6486 | 0,003 | 0,186 | 0,193 |
| Vzorek 1,5 | 0,23 | 0,16 | 0,70 | 5672 | 0,004 | 0,225 | 0,234 |
| Vzorek 2 | 0,26 | 0,20 | 0,77 | 4518 | 0,005 | 0,254 | 0,265 |
| Vzorek 2,5 | 0,26 | 0,20 | 0,77 | 4387 | 0,005 | 0,254 | 0,265 |
| Vzorek 3 | 0,26 | 0,20 | 0,77 | 4387 | 0,005 | 0,254 | 0,265 |
| Vzorek 3,5 | 0,26 | 0,20 | 0,77 | 4415 | 0,005 | 0,254 | 0,265 |
| Vzorek 4 | 0,25 | 0,20 | 0,80 | 4690 | 0,005 | 0,244 | 0,255 |
| Vzorek 4,5 | 0,26 | 0,20 | 0,77 | 4573 | 0,005 | 0,254 | 0,265 |
| Vzorek 5 | 0,26 | 0,20 | 0,77 | 4520 | 0,005 | 0,254 | 0,265 |



Graf 8 Závislost max Feretův průměr na plošnou hmotnost

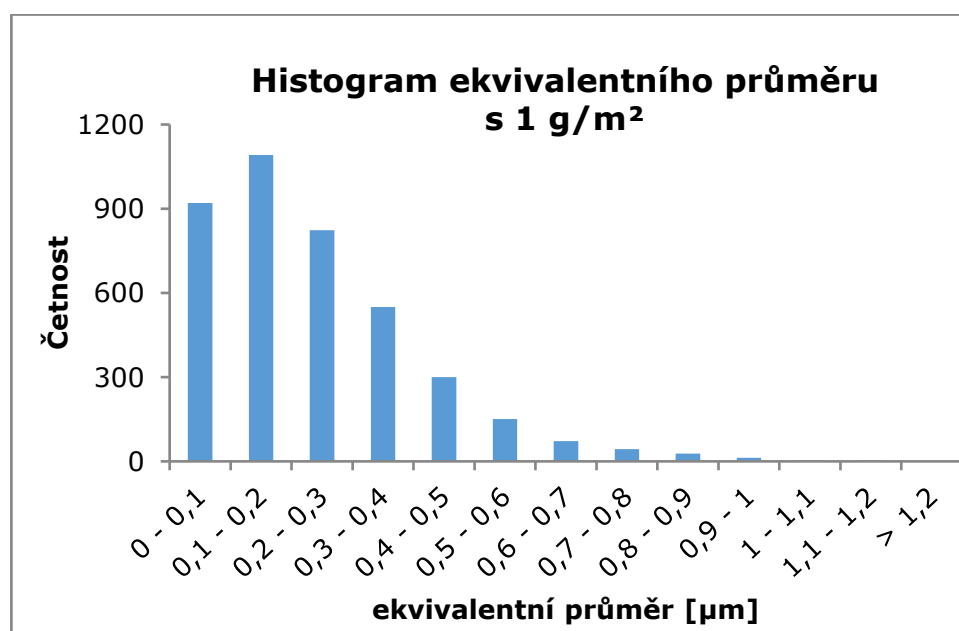


Graf 9 Závislost min Feretův průměr na plošnou hmotnost

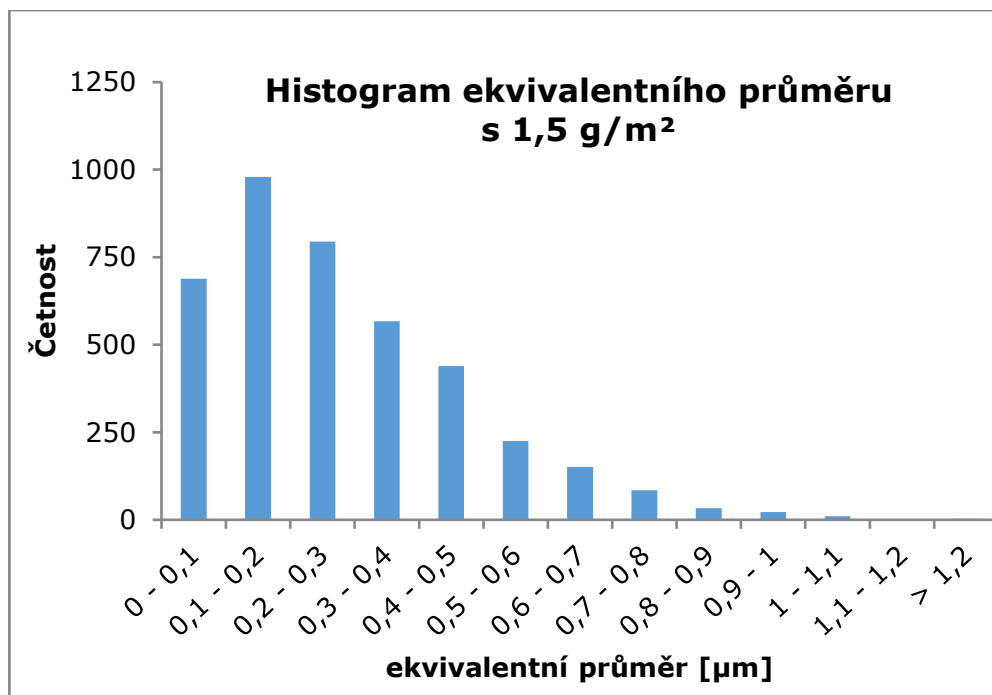
Analýza

Z hodnocení minimálního a maximálního Feretova průměru je nejmenší pro první dva Vzorky 1 a 1,5, kdy je zřejmé, že v rámci intervalu spolehlivosti dochází k vybočení z přibližně konstantní řady – hodnoty jsou nižší. Hodnocení vykazuje v podstatě stejnou hodnotu pro Vzorky 2 až 5. Vyplyvá z toho, že plošná hmotnost vzorků neměla vliv na minimální a maximální Feretův průměr porů.

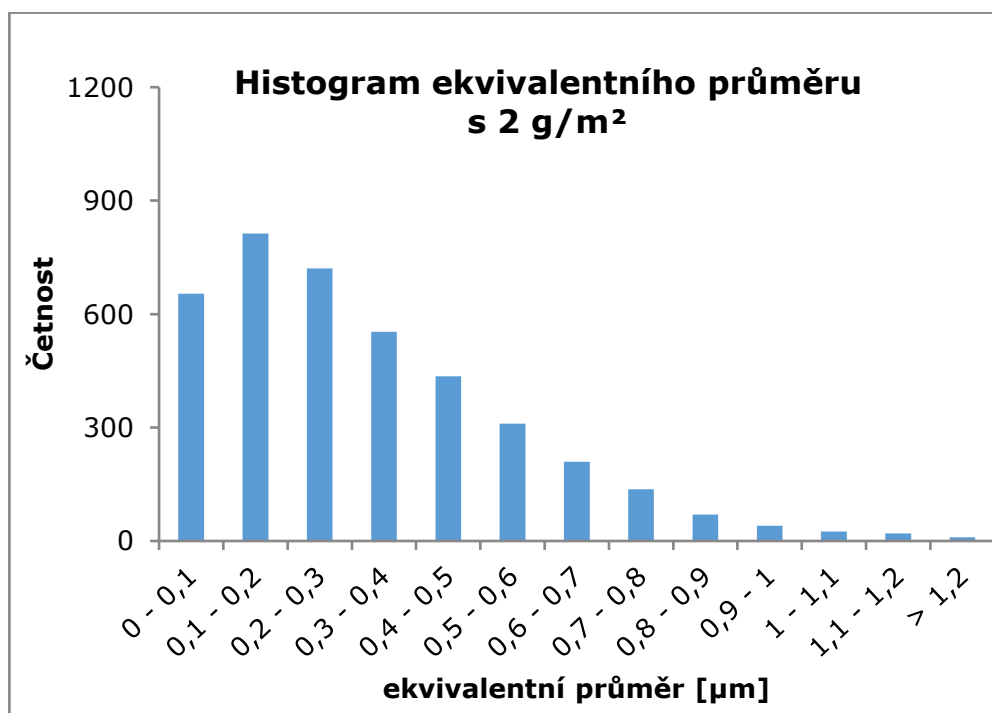
Níže jsou vloženy histogramy popisující závislost velikosti ekvivalentního póru na četnosti. Z kapacitních důvodů práce jsou tabulky s výpočty součástí přílohy C.



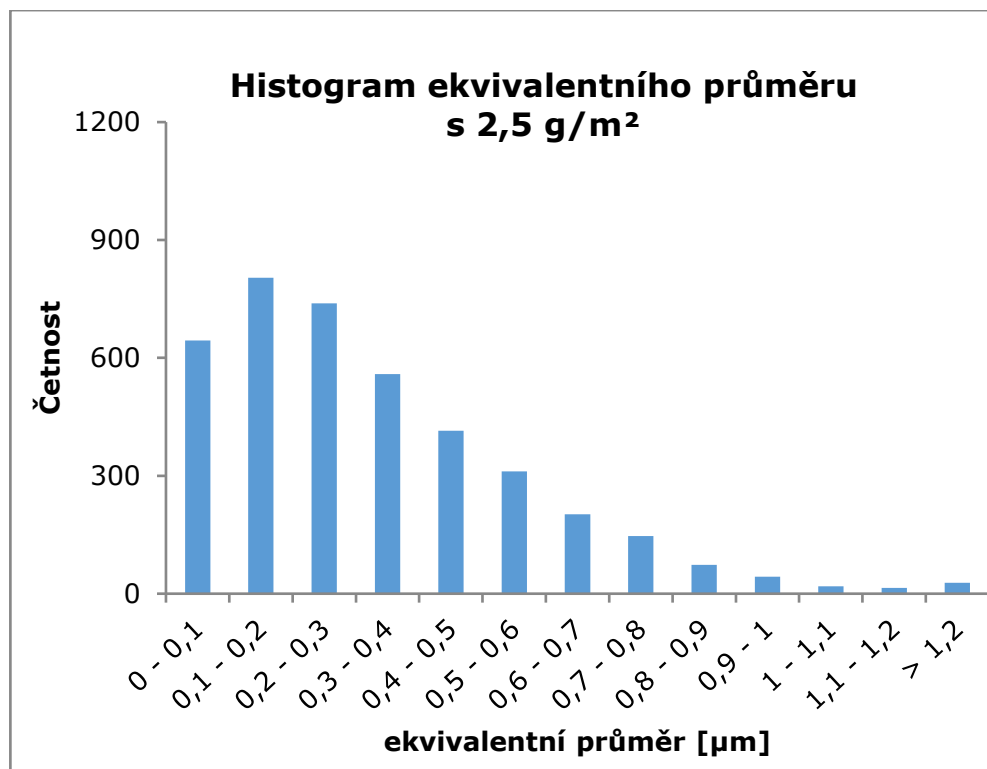
Graf 10 Histogram Vzorek 1 – závislost velikosti průměru porů na četnosti



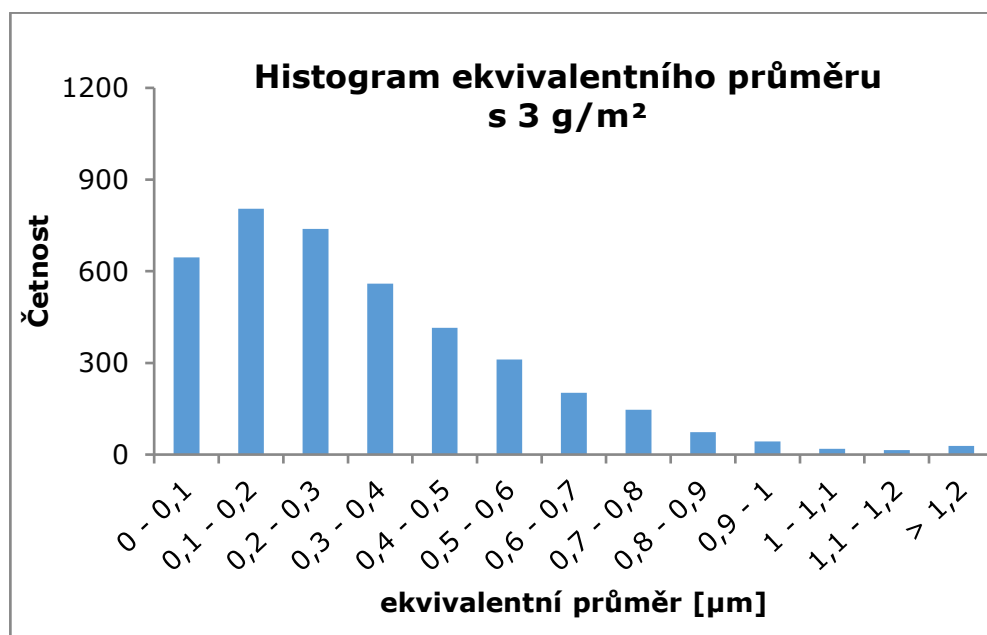
Graf 11 Histogram Vzorek 1,5 – závislost velikosti průměru pórů na četnosti



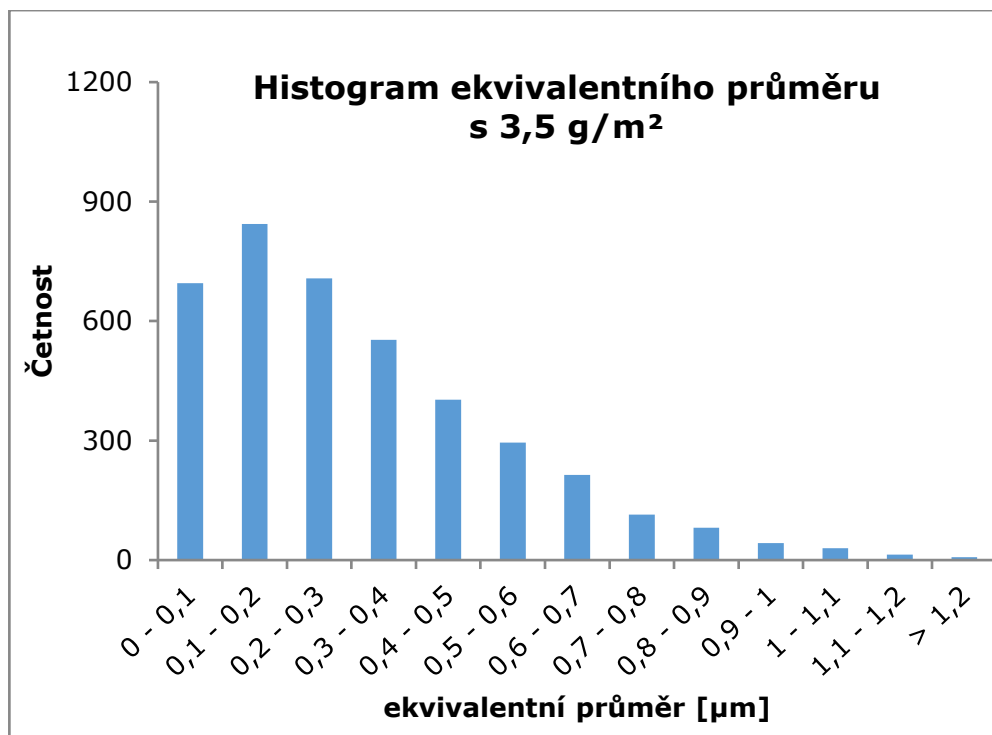
Graf 12 Histogram Vzorek 2 – závislost velikosti průměru pórů na četnosti



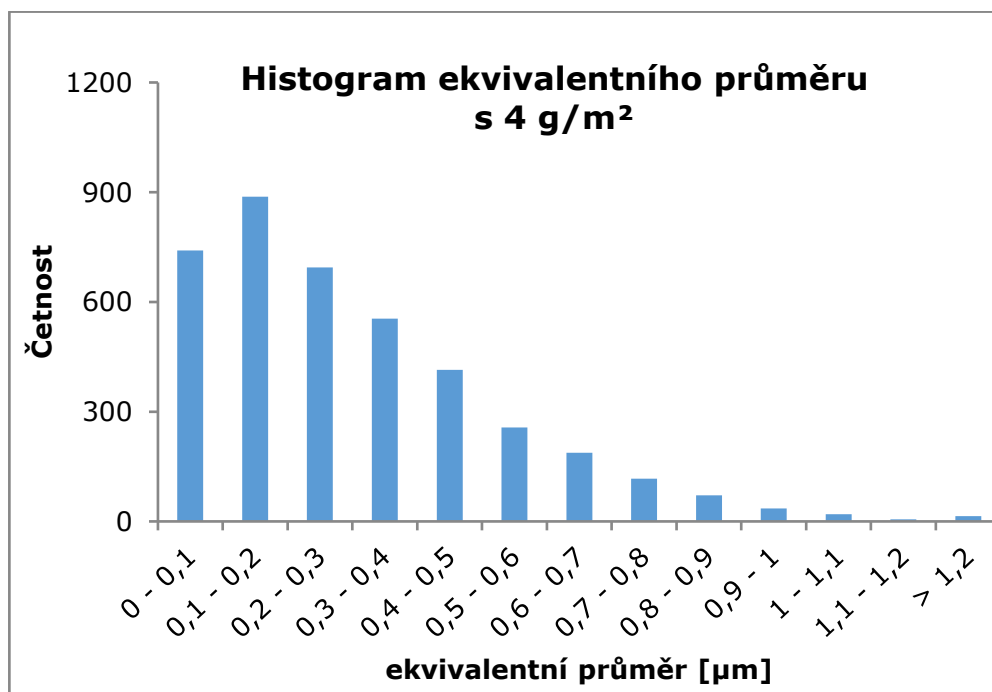
Graf 13 Histogram Vzorek 2,5 – závislost velikosti průměru pórů na četnosti



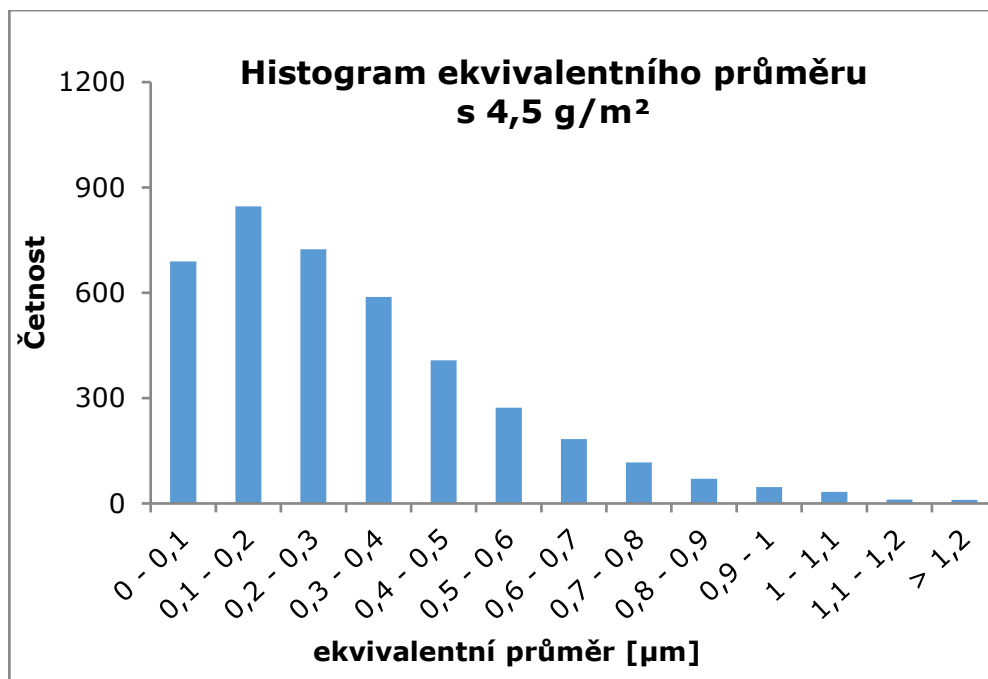
Graf 14 Histogram Vzorek 3 – závislost velikosti průměru pórů na četnosti



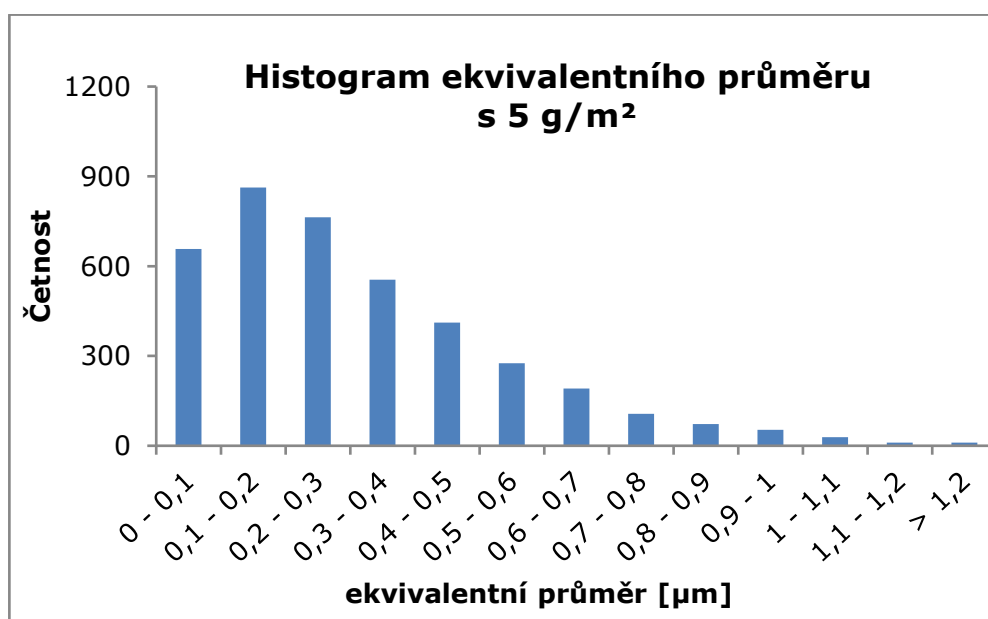
Graf 15 Histogram Vzorek 3,5 – závislost velikosti průměru pórů na četnosti



Graf 16 Histogram Vzorek 4 – závislost velikosti průměru pórů na četnosti



Graf 17 Histogram Vzorek 4,5 – závislost velikosti průměru pórů na četnosti



Graf 18 Histogram Vzorek 5 – závislost velikosti průměru pórů na četnosti

Analýza

Rozdělení ekvivalentních pórů je silně pravostranně zešikmené. Hodnoty velmi pomalu ubývají. Modus je stanoven v rozpětí velikosti průměru od 0,1 do 0,2 μm, kde se nachází nejvyšší počet pórů u všech vzorků. Medián leží ve stejném rozpětí. Ze srovnání histogramů lze vidět, že u plošné hmotnosti 1 a 1,5 g/m² je četnost pórů s ekvivalentním průměrem nad 0,6 μm zanedbatelná, naproti tomu u vzorků s vyšší plošnou hmotností

jsou i póry od $0,6\ \mu\text{m}$ zastoupeny mnohem významněji. Toto pozorování souhlasí (odpovídá) s výše zjištěnými fakty, že střední hodnota ekvivalentního průměru vzorků s plošnou hmotností 1 a $1,5\ \text{g/m}^2$ byla nižší než u vzorků s vyšší plošnou hmotností.

Podle dat v příloze lze vidět, že hodnoty ekvivalentního průměru a Feretova průměru vykazovaly podobné výsledky.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce byla analýza nanovláknenných membrán pro oděvní účely. V dnešní době výrobce nanovláknenných membrán vyrábí membrány s plošnou hmotností větší než 5 g/m^2 . Tyto nanovláknenné membrány jsou používány pro oděvní účely outdoorových aktivit.

Tato práce podrobuje analýze nanovláknenné membrány s nízkou plošnou hmotností v rozpětí od 1 g/m^2 do 5 g/m^2 . K hodnocení bylo využito měření hydrostatické odolnosti, paropropustnosti, prodyšnosti a obrazové analýzy nanovláknenné textilie vyrobené s plošnou hmotností v rozmezí od 1 do 5 g/m^2 .

Teoretická část je vypracována do několika sekcí, které obsahují podstatné informace potřebné k experimentální části práce. Tato část představila nejznámější výrobce membrán a zároveň výrobce nanovláknenných membrán Nanomembrane, jejichž charakteristika membrán a parametry byly v této části rovněž rozebrány.

Experimentální část představila výsledky jednotlivých měření a následné analýzy. Všechna měření proběhla na Katedře hodnocení textilií Technické univerzity v Liberci.

Z experimentu je zřejmé, že deklarované hodnoty plošné hmotnosti nanovláknenných membrán výrobcem odpovídaly naměřeným hodnotám.

U prodyšnosti byl nejlépe vyhodnocený Vzorek 1, který měl nejmenší plošnou hmotnost 1 g/m^2 . S rostoucí plošnou hmotností nanovláknenné membrány se prodyšnost snižovala.

Všechny vzorky nanovláknenných membrán vykazovaly extrémně vysokou paropropustnost.

Co se týče hydrostatické odolnosti, lze všechny membrány označit za nepromokavé, neboť výška vodního sloupce byla vyšší než 1 300 mm. Avšak nutno podotknout, že nevykazovaly vysokou hydrostatickou odolnost, a proto by bylo dobré se v budoucnu zaměřit na tato hodnocení podrobněji a nanovláknennou membránu nebo finální úpravu membrány upravit, aby vykazovala vyšší hydrostatickou odolnost.

Mikroskopické snímky vzorků se od sebe moc nelišily, velmi se podobaly. Sloužily však k hodnocení pórovitosti, která vykazovala, vzhledem k nízkým plošným hmotnostem nanovláknenných membrán, extrémně vysoký počet pórů na cm^2 . Plošná hmotnost vzorků neměla vliv na ekvivalentní průměr a Feretův průměr pórů. U všech měřených vzorků se nacházelo nejvíce pórů ve velikosti průměru od 0,1 do 0,2 μm .

Z hodnocení nanovláknenných membrán vyplývá, že všechny vzorky vykazovaly extrémně vysoké hodnoty pro paropropustnost a pórovitost, zatímco ukázaly poměrně nízkou hydrostatickou odolnost.

Hodnocení vzorků nanovláknenných membrán potvrdila možnost využití membrán s plošnou hmotností pod 5 g/ m^2 za účelem dosažení lepšího komfortu v rámci extrémně vysoké paropropustnosti. Pokud by se měl vybrat pouze jeden vzorek z hlediska analýz, byl by to vzorek 1 s nejnižší plošnou hmotností, protože vykazoval nejlepší hodnoty pro prodyšnost a paropropustnost.

Na závěr této práce je také nutno dodat, že by byla potřeba provést další analýza pro vzorky 1 / 1,5 / 2 / 2,5 kvůli jejich velmi nízké plošné hmotnosti, a tudíž nesnadné manipulaci se vzorky během testování.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Hes, L., Sluka, P.: *Úvod do komfortu textilií*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005. ISBN: 80-7083-926-0.
- [2] Knížek, R.: *Oděvy pro sportovní a outdoorové aktivity*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2013. ISBN: 978-80-7494-012-5.
- [3] RŮŽIČKOVÁ, D.: *Oděvní materiály*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2003. ISBN 80-7083-682-2.
- [4] Dembický, J., Kryštůfek, J., Machaňová, D., Odvárka, J., Prášil, M., K.: *Zušlechťování textilií*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008. ISBN 978-80-7372-321-7.
- [5] BLAŽEJ, Anton, a kol. *Špeciálne chemické úpravy textilií*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1986. 268 s. 63-261-86

Internetové stránky

- [6] *Fakta a mýty o membránovém oblečení* [online], [citováno 7. srpna 2016]
Dostupné z: <http://www.faramugo.cz/blog/2016/01/fakta-a-myty-o-membranovem-obleceni/>
- [7] *DWR Decoded* [online], [citováno 7. srpna 2016] Dostupné z:
<http://www.backcountry.com/explore/dwr-decoded>
- [8] *Membrány a zátěry pod lupou* [online], [citováno 7. srpna 2016] Dostupné z:
<http://www.kalimera.cz/index.php?page=disc&disc=16>
- [9] *Technologie Nanomembrane* [online], [citováno 12. září 2016] Dostupné z:
<http://www.nanomembrane.cz/cs/technologie>
- [10] *Víte, co si oblékáte? I.* [online], [citováno 17. září 2016] Dostupné z:
<http://www.svetoutdooru.cz/clanek/?107711-vite,-co-si-oblekate?-i>
- [11] *Mikroporézní membrány* [online], [citováno 7. srpna 2016] Dostupné z:
http://www.ft.tul.cz/depart/kde/studium/predmetyPRILOHY/6_sport0.pdf
- [12] *Víte, co si oblékáte? I.* [online], [citováno 10. října 2016] Dostupné z:
<http://www.svetoutdooru.cz/clanek/?107711-vite,-co-si-oblekate?-i>

- [13] *Laminace membrány* [online], [citováno 10. října 2016] Dostupné z:
<http://www.rockpoint.cz/laminace-membrany/w-73/>
- [14] *Víte co si oblékáte?* [online], [citováno 15. října 2016] Dostupné z:
<http://jumpsport.cz/poradna/vite-co-si-oblekate>
- [15] *Laminace membrány* [online], [citováno 15. října 2016] Dostupné z:
<http://www.rockpoint.cz/laminace-membrany/w-73/>
- [16] *Zátěr a membrána* [online], [citováno 25. října 2016] Dostupné z:
<http://www.outdoorguide.cz/zater-a--membrana-40.html>
- [17] *At' to má membránu* [online], [citováno 28. října 2016] Dostupné z:
<http://www.aventuro.cz/at-to-ma-membranu/>
- [18] *Gore-text* [online], [citováno 28. října 2016] Dostupné z: <http://www.gore-tex.com/remote/Satellite/home/>
- [19] *Technologie Nanomembrane* [online], [citováno 3. listopadu 2016] Dostupné z:
<http://www.nanomembrane.cz/cs/technologie>
- [20] *Company profile* [online], [citováno 3. listopadu 2016] Dostupné z:
<http://www.sympatex.com/en/company/202/company-profile>
- [21] *Superb waterproofness and tough performance that withstands all-round outdoor conditions* [online], [citováno 3. listopadu 2016] Dostupné z:
http://www.torayentrant.com/en/products/dermizax/der_001.html
- [22] *Efekt lotosového květu* [online], [citováno 3. listopadu 2016] Dostupné z:
<http://nanotechnologia.7x.cz/veda-ma-svoj-zmysel-pokial-sa/bionika-je-vedny-odbor/efekt-lotosoveho-kvetu>
- [23] *Finální úpravy textilií IV* [online], [citováno 3. listopadu 2016] Dostupné z:
<http://dirk.kmi.tul.cz/depart/ktc/sylaby/ZUT/ZUT%2016.pdf>
- [24] *Netkané textilie* [online], [citováno 3. listopadu 2016] Dostupné z:
https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/938/mod_resource/content/1/Oldrich%20Jirak%20a%20Klara%20Kalinov%C3%A11.pdf
- [25] *Technologie plazmy* [online], [citováno 15. prosince 2016] Dostupné z:
http://www.thierry-corp.com/fileadmin/user_upload/downloads/broshures/Plasma_Technology.pdf

- [26] *Pokročilá výroba* [online], [citováno 7. srpna 2016] Dostupné z: <http://r2nano.org/advanced-manufacturing/>
- [27] *Způsob výroby nanovláken z polymerního roztoku elektrostatickým zvláknováním a zařízení k provádění způsobu* [online], [citováno 5. listopadu 2016] Dostupné z: <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/294/294272.pdf>
- [28] *Roll to roll výrobní proces* [online], [citováno 3. prosince 2016] Dostupné z: <https://energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/QTR%20Ch8%20-%20Roll%20To%20Roll%20Processing%20TA%20Feb-13-2015.pdf>
- [29] *Water- and Stain-repellent Textiles, Using New Plasma Technology* [online], [citováno 5. listopadu 2016] Dostupné z: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/172069/172069.pdf>
- [30] *Vyvíjíme novou unikátní nanovláknennou membránu* [online], [citováno 5. listopadu 2016] Dostupné z: <http://www.svitap.cz/novinky/detail/vyvijime-novou-unikatni-nanovlakennou-membranu.htm>
- [31] *Technologie Nanomembrane* [online], [citováno 5. listopadu 2016] Dostupné z: <http://www.nanomembrane.cz/cs/technologie>
- [32] *Perfluorované látky* [online], [citováno 10. listopadu 2016] Dostupné z: <http://www.gore-tex.cz/cs-cz/zkusenosti/odpovednost/zivotni-prostredi/perfluorovane-latky>
- [33] *Charakteristika nanovláken* [online], [citováno 3. prosince 2016] Dostupné z: <http://www.elmarco.cz/technologie/nanovlakna/>
- [34] *Nanovláknenné filtry a jejich použití v sanačních technologiích* [online], [citováno 14. listopadu 2016] Dostupné z: <http://artec.tul.cz/?content=upload/ARTEC-kapitola6-sidlof-hruza.pdf&lang=cs>
- [35] *Ochranné oděvy bariérové textilie* [online], [citováno 16. listopadu 2016] Dostupné z: <http://docplayer.cz/7241021-Ochranne-odevy-barierove-textilie-jana-drasarova.html>
- [36] *About nanofibres* [online], [citováno 28. prosince 2016] Dostupné z: <http://www.snsnano.com/aboutnanofibers.asp>

- [37] *Teoretická a experimentální analýza struktury a vlastností polopropustných membrán pro oděvní účely* [online], [citováno 2. Února 2017] Dostupné z: <http://www.ft.tul.cz/document/1261>
- [38] *Nánosové úpravy textilií* [online], [citováno 15. Února 2017] Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/N%C3%A1nosov%C3%A9_%C3%BApravy_textili%C3%AD#Druhy_n.C3.A1nosov.C3.A1n.C3.AD

Normy

- [39] ČSN EN ISO 9237 (80 0817). *Textilie: Zjišťování prodyšnosti plošných textilií*. Praha: Český normalizační institut, 1996.

Seznam obrázků, tabulek a grafů

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. 1 Odvod kapalné vlhkosti | 13 |
| Obr. 2 Schéma přístroje Permetest | 14 |
| Obr. 3 Ukázka přístroje FX 300 (vlastní fotografie) | 15 |
| Obr. 4 Zjednodušený model měření hydrostatické odolnosti | 16 |
| Obr. 5 Přístroj FX3000 pro měření hydrostatické odolnosti textilií od firmy SDL/ATLAS | 17 |
| Obr. 6 Ukázka třívrstvého oděvního systému..... | 17 |
| Obr. 7 Funkce a umístění membrány | 19 |
| Obr. 8 Ukázka mikroskopického snímku nanovlákněné membrány Nanomembrane vyrobená z polyamidu 6 (vlastní snímek)..... | 21 |
| Obr. 9 Ukázka recyklovatelnosti ve firmě Sympatex | 22 |
| Obr. 10 ukázka voděodolného a parapropustného mechanismu u výrobků Dermizax | 23 |
| Obr. 11 Vizuální příklady laminací membrán | 24 |
| Obr. 12 Molekuly uvnitř kapaliny (vlevo) a molekuly na povrchu kapaliny (vpravo) .. | 25 |
| Obr. 13 Znázornění tvaru kapky kapaliny L na pevném povrchu S a směry povrchových a mezipovrchových sil | 25 |
| Obr. 14 Lotosový květ - Lotosový efekt..... | 25 |
| Obr. 15 Chemický vzorec silikonu | 26 |
| Obr. 16 Chemický vzorec Perfluorovaný alkyl | 26 |
| Obr. 17 Porovnání nanovláken s vlasem a pylovým zrnkem | 29 |
| Obr. 18 Schéma elektrostatického zvlákňování..... | 29 |
| Obr. 19 Vlevo neošetřená bavlněná textilie, vpravo plazmou ošetřená hydrofobní bavlněná textilie..... | 31 |
| Obr. 20 Mikroskopické snímky vzorků | 43 |

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tab. 1 Popisná statistika plošné hmotnosti | 34 |
| Tab. 2 Popisná statistika naměřených dat prodyšnosti | 36 |
| Tab. 3 Popisná statistika naměřených dat výparného odporu..... | 38 |
| Tab. 4 Popisná statistika hodnot relativní paropropustnosti | 39 |
| Tab. 5 Popisná statistika naměřených dat hydrostatické odolnosti | 41 |
| Tab. 6 Střední hodnoty počtu pórů v binárním poli a na cm ² | 44 |
| Tab. 7 Popisná statistika naměřených dat počtu pórů na cm ² | 44 |
| Tab. 8 Popisná statistika ekvivalentních pórů | 46 |
| Tab. 9 Maximální Feretův průměr | 47 |
| Tab. 10 Minimální Feretův průměr..... | 48 |

Seznam grafů

| | |
|---|----|
| Graf 1 Hodnocení závislosti vzorků na plošné hmotnosti | 34 |
| Graf 2 Hodnocení hodnot prodyšnosti vzorků..... | 36 |
| Graf 3 Vyhodnocení hodnot výparného odporu | 38 |
| Graf 4 Vyhodnocení hodnot relativní paropropustnosti | 39 |
| Graf 5 Vyhodnocení hodnot hydrostatické odolnosti | 41 |
| Graf 6 Hodnocení počtu pórů pro jednotlivé vzorky z naměřených a vypočítaných dat..... | 45 |
| Graf 7 Závislost ekvivalentního průměru na plošnou hmotnost..... | 46 |
| Graf 8 Závislost max Feretův průměr na plošnou hmotnost | 48 |
| Graf 9 Závislost min Feretův průměr na plošnou hmotnost | 49 |
| Graf 10 Histogram Vzorek 1 – závislost velikosti průměru pórů na četnosti..... | 49 |
| Graf 11 Histogram Vzorek 1,5 – závislost velikosti průměru pórů na četnosti..... | 50 |
| Graf 12 Histogram Vzorek 2 – závislost velikosti průměru pórů na četnosti..... | 50 |
| Graf 13 Histogram Vzorek 2,5 – závislost velikosti průměru pórů na četnosti..... | 51 |
| Graf 14 Histogram Vzorek 3 – závislost velikosti průměru pórů na četnosti..... | 51 |
| Graf 15 Histogram Vzorek 3,5 – závislost velikosti průměru pórů na četnosti..... | 52 |
| Graf 16 Histogram Vzorek 4 – závislost velikosti průměru pórů na četnosti..... | 52 |
| Graf 17 Histogram Vzorek 4,5 – závislost velikosti průměru pórů na četnosti..... | 53 |
| Graf 18 Histogram Vzorek 5 – závislost velikosti průměru pórů na četnosti..... | 53 |

SEZNAM PŘÍLOH

| | |
|------------------------|-----------|
| Příloha A | I |
| Příloha B | V |
| Příloha C | XI |

Příloha A

Naměřená data plošné hmotnosti

Naměřená data prodyšnosti

Naměřená data paropropusnosti

Naměřená data hydrostatické odolnosti

Tab. 1 Naměřená hmotnost vzorků s rozměrem 10 x 10 cm.

| Vzorky: | Naměřené hodnoty - hmotnost | | | | |
|-------------------|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | [g] | | | | |
| Vzorek 1 | 0,0130 | 0,0122 | 0,0099 | 0,0109 | 0,0117 |
| Vzorek 1,5 | 0,0155 | 0,0132 | 0,0183 | 0,0148 | 0,0177 |
| Vzorek 2 | 0,0189 | 0,0210 | 0,0201 | 0,0219 | 0,0198 |
| Vzorek 2,5 | 0,0238 | 0,0233 | 0,0263 | 0,0254 | 0,0259 |
| Vzorek 3 | 0,0318 | 0,0304 | 0,0289 | 0,0309 | 0,0278 |
| Vzorek 3,5 | 0,0367 | 0,0345 | 0,0332 | 0,0358 | 0,0343 |
| Vzorek 4 | 0,0388 | 0,0423 | 0,0410 | 0,0382 | 0,0419 |
| Vzorek 4,5 | 0,0464 | 0,0438 | 0,0434 | 0,0466 | 0,0457 |
| Vzorek 5 | 0,0513 | 0,0511 | 0,0488 | 0,0509 | 0,0492 |

Tab. 2 Naměřená data prodyšnosti

| Vzorky: | Naměřené hodnoty - Prodyšnost | | | | |
|-------------------|-------------------------------|------|------|------|------|
| | [cm/s] | | | | |
| Vzorek 1 | 1600 | 1610 | 1600 | 1590 | 1610 |
| Vzorek 1,5 | 1110 | 1140 | 1110 | 1130 | 1120 |
| Vzorek 2 | 885 | 880 | 888 | 885 | 883 |
| Vzorek 2,5 | 701 | 698 | 685 | 690 | 687 |
| Vzorek 3 | 593 | 592 | 592 | 593 | 590 |
| Vzorek 3,5 | 529 | 526 | 525 | 527 | 526 |
| Vzorek 4 | 494 | 501 | 484 | 499 | 502 |
| Vzorek 4,5 | 452 | 448 | 450 | 447 | 450 |
| Vzorek 5 | 412 | 413 | 410 | 410 | 411 |

Tab. 3 Naměřené hodnoty výparného odporu.

| Vzorky: | Naměřené hodnoty - výparný odpor | | | | |
|------------|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | Ret - [Pa.M ² /W] | | | | |
| Vzorek 1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,1 |
| Vzorek 1,5 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,1 | 0,1 |
| Vzorek 2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,1 |
| Vzorek 2,5 | 0,2 | 0,1 | 0,0 | 0,2 | 0,1 |
| Vzorek 3 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Vzorek 3,5 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Vzorek 4 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,3 |
| Vzorek 4,5 | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Vzorek 5 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,3 |

Tab. 4 Naměřené hodnoty relativní paropropustnosti

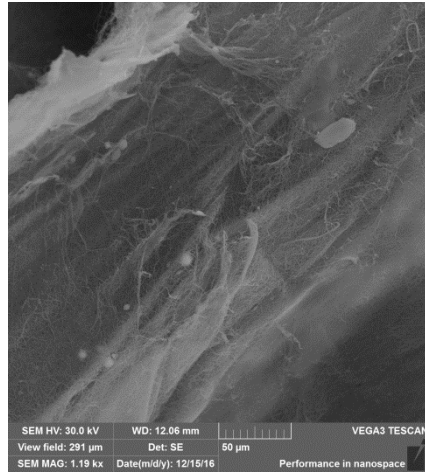
| Vzorky: | Naměřené hodnoty - relativní paropropustnost | | | | |
|------------|--|------|-------|------|------|
| | P[%] | | | | |
| Vzorek 1 | 99,8 | 99,8 | 100,0 | 99,6 | 98,1 |
| Vzorek 1,5 | 97,8 | 98,2 | 99,8 | 98,3 | 98,0 |
| Vzorek 2 | 97,7 | 98,1 | 98,2 | 96,8 | 98,5 |
| Vzorek 2,5 | 96,7 | 98,2 | 99,8 | 96,3 | 97,5 |
| Vzorek 3 | 96,5 | 96,8 | 97,9 | 98,2 | 98,5 |
| Vzorek 3,5 | 97,8 | 96,9 | 96,2 | 96,9 | 96,6 |
| Vzorek 4 | 96,3 | 96,9 | 96,8 | 96,5 | 94,8 |
| Vzorek 4,5 | 96,7 | 94,9 | 96,5 | 96,4 | 96,8 |
| Vzorek 5 | 96,5 | 94,7 | 94,9 | 96,4 | 96,8 |

Tab. 5 Naměřené hodnoty hydrostatické odolnosti

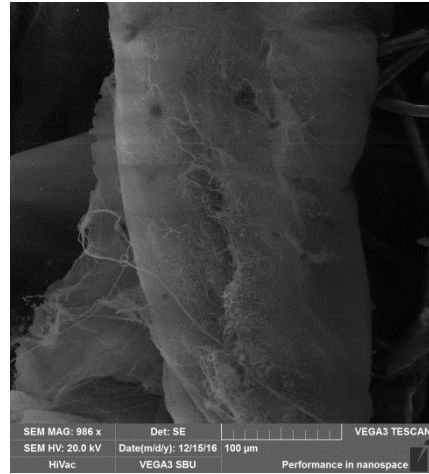
| Vzorky: | Naměřené hodnoty - Hydrostatická odolnost | | | | |
|-------------------|---|------|------|------|------|
| | [mm H ₂ O] | | | | |
| Vzorek 1 | 1122 | 497 | 1220 | 487 | 825 |
| Vzorek 1,5 | 1145 | 983 | 3198 | 6342 | 1498 |
| Vzorek 2 | 7288 | 6864 | 4863 | 4122 | 3484 |
| Vzorek 2,5 | 7902 | 7687 | 7441 | 8147 | 8730 |
| Vzorek 3 | 8208 | 7341 | 7637 | 7924 | 7445 |
| Vzorek 3,5 | 8344 | 8785 | 8157 | 8530 | 8432 |
| Vzorek 4 | 8376 | 7715 | 7108 | 8860 | 9310 |
| Vzorek 4,5 | 8918 | 7632 | 9339 | 9183 | 7635 |
| Vzorek 5 | 9278 | 9193 | 9203 | 8040 | 9191 |

Příloha B

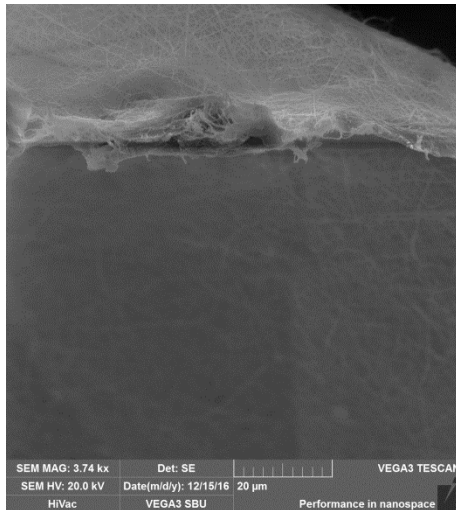
Pořízené mikroskopické snímky vzorků podélného
a příčného řezu.



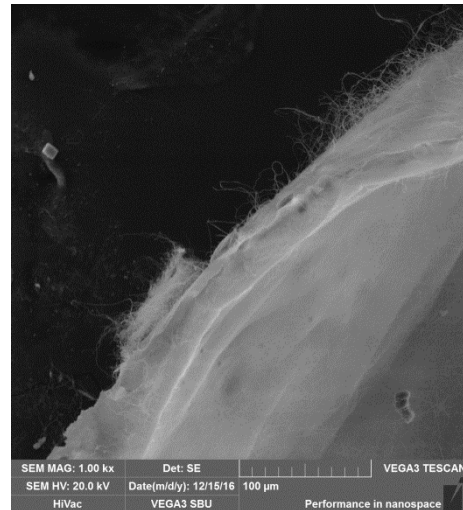
1 g/m²



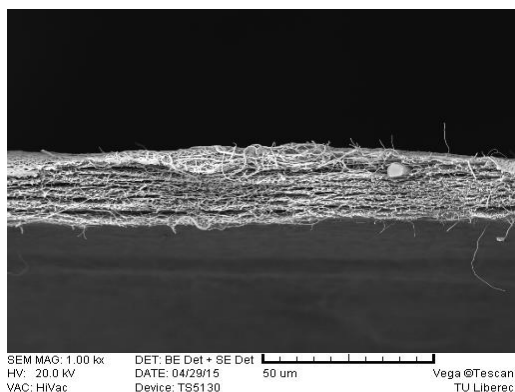
1,5 g/m²



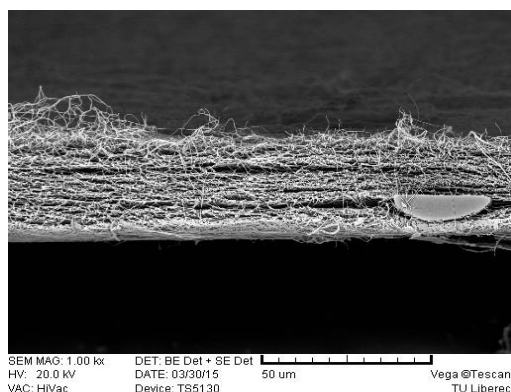
2 g/m²



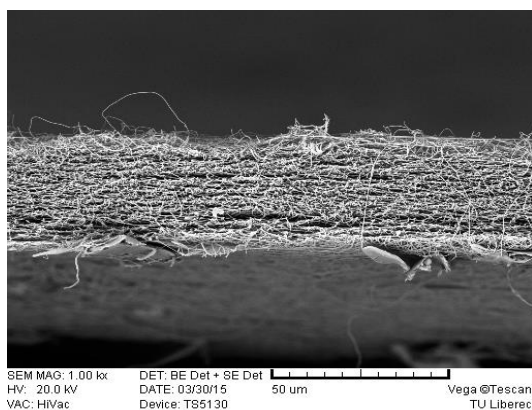
2,5 g/m²



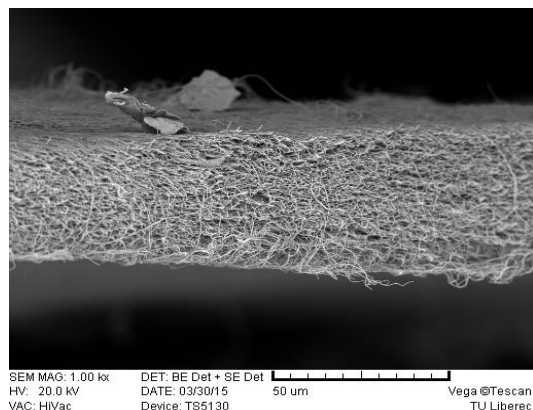
3 g/m²



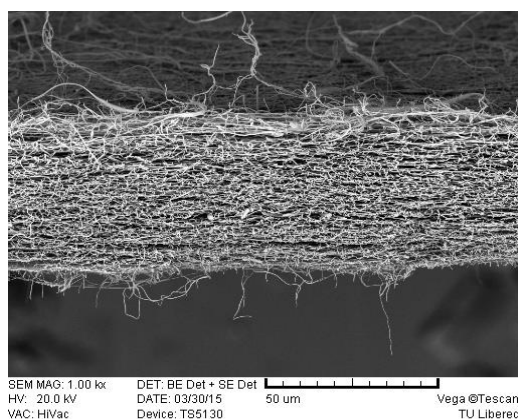
3,5 g/m²



4 g/m²



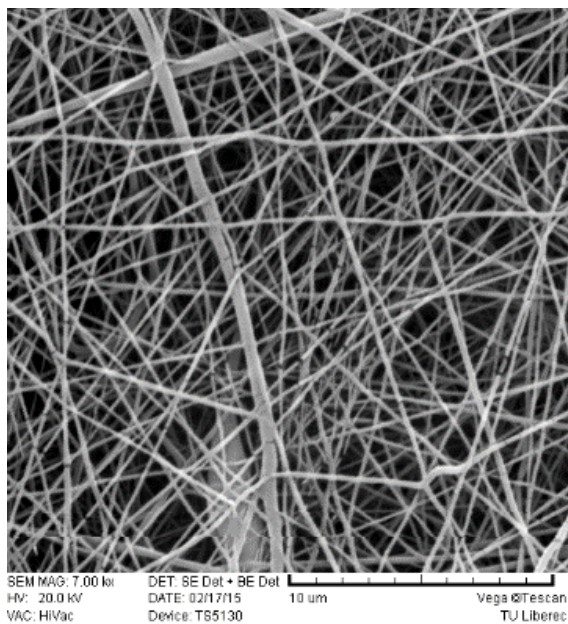
4,5 g/m²



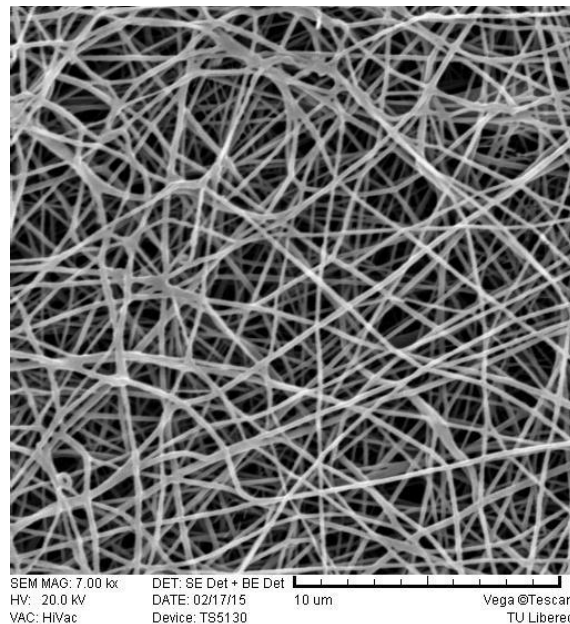
5 g/m²

Obr. 1 Mikroskopické snímky vzorků příčného řezu. Měřítko je 50 μm .

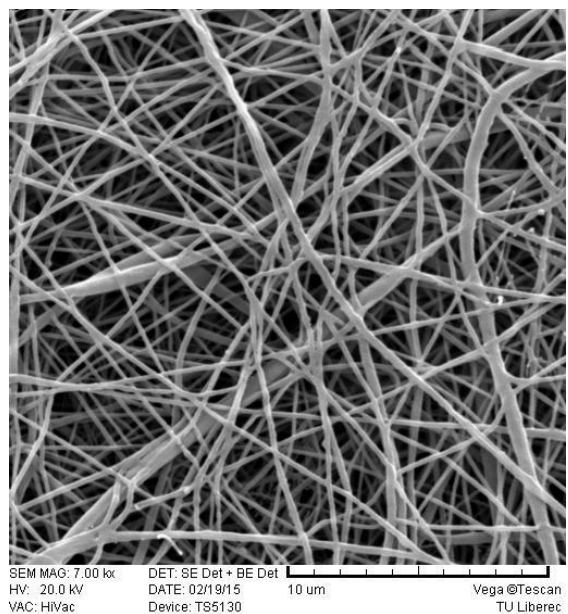
Pozn.: První čtyři mikroskopické snímky byly pořízené na jiném mikroskopu s jiným měřítkem a s jiným nastavením.



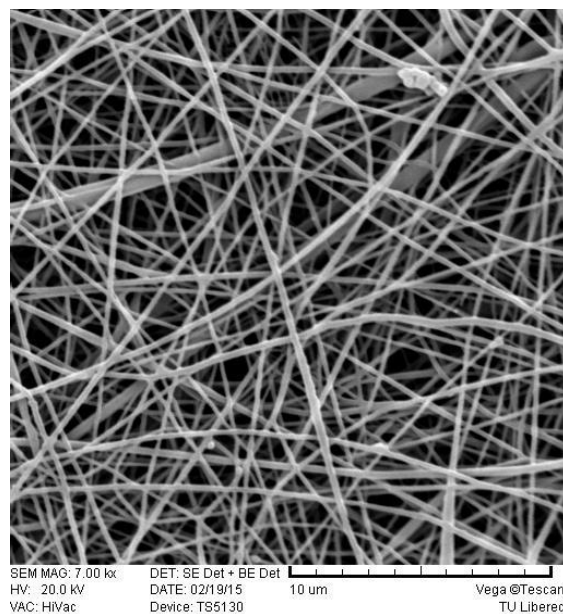
Vzorek 1



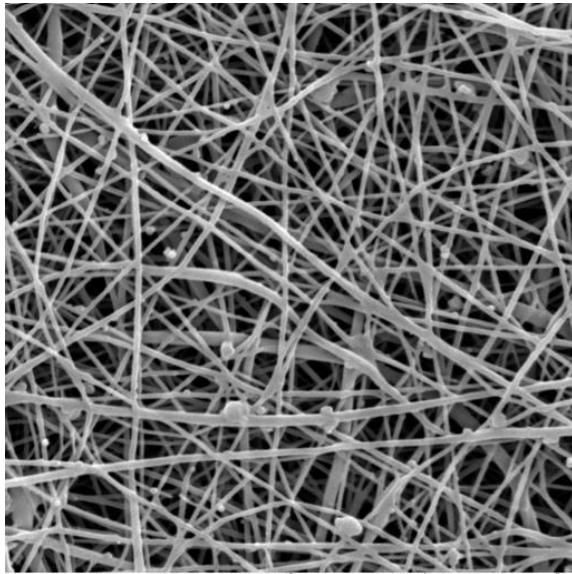
Vzorek 1,5



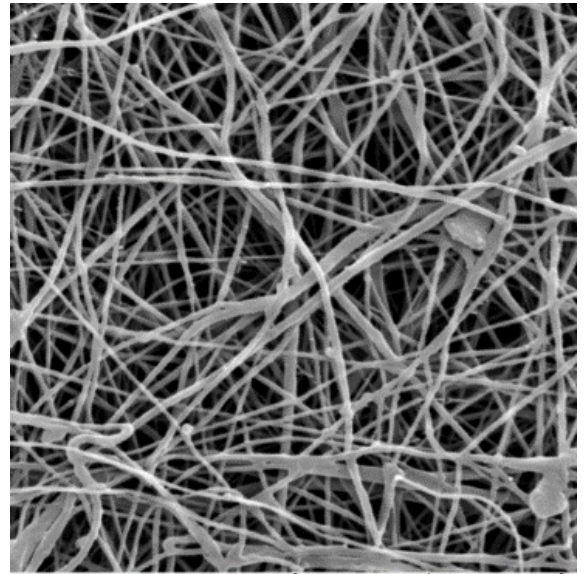
Vzorek 2



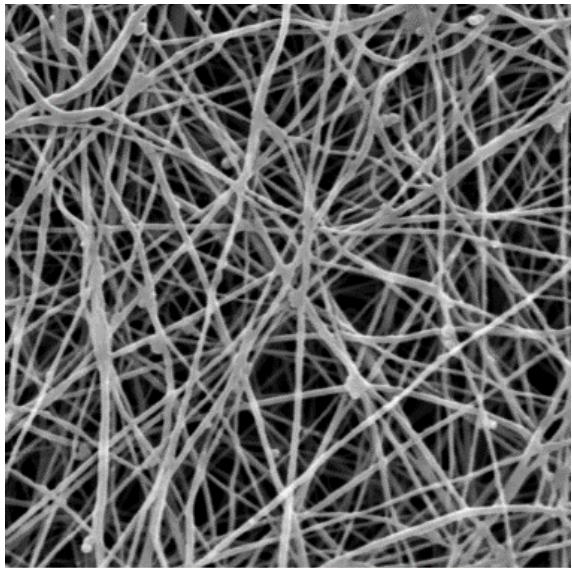
Vzorek 2,5



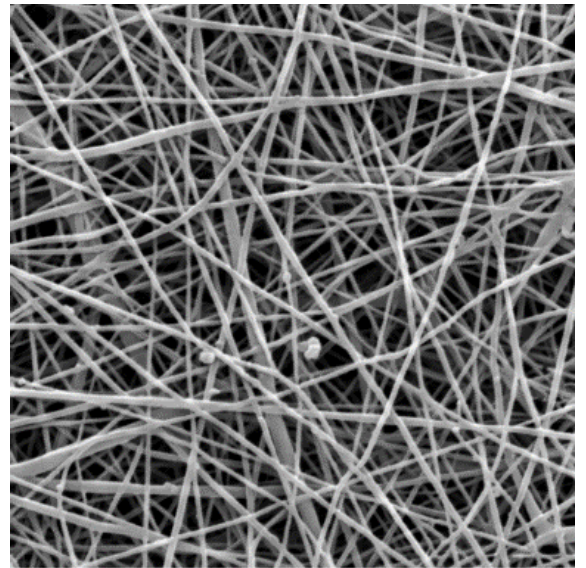
Vzorek 3



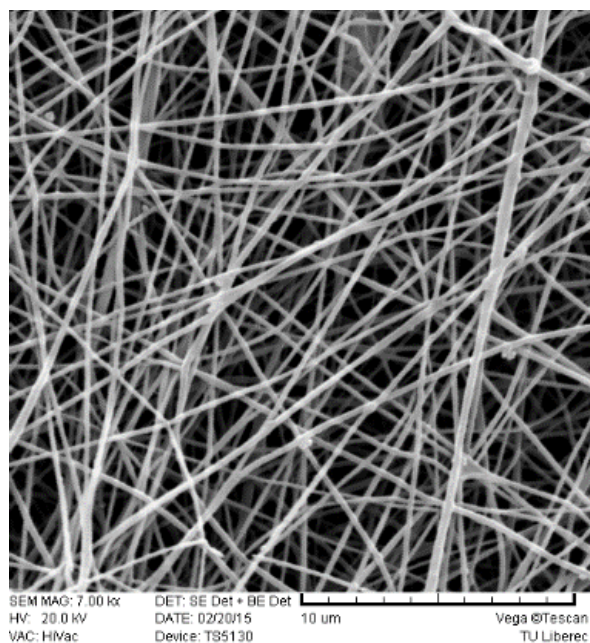
Vzorek 3,5



Vzorek 4



Vzorek 4,5



Vzorek 5

Obr. 2 Mikroskopické snímky vzorků podélného řezu pro obrazovou analýzu. Měřítka 10 μm

Příloha C

Data z obrazové analýzy – Ekvivalentní a Feretův průměr

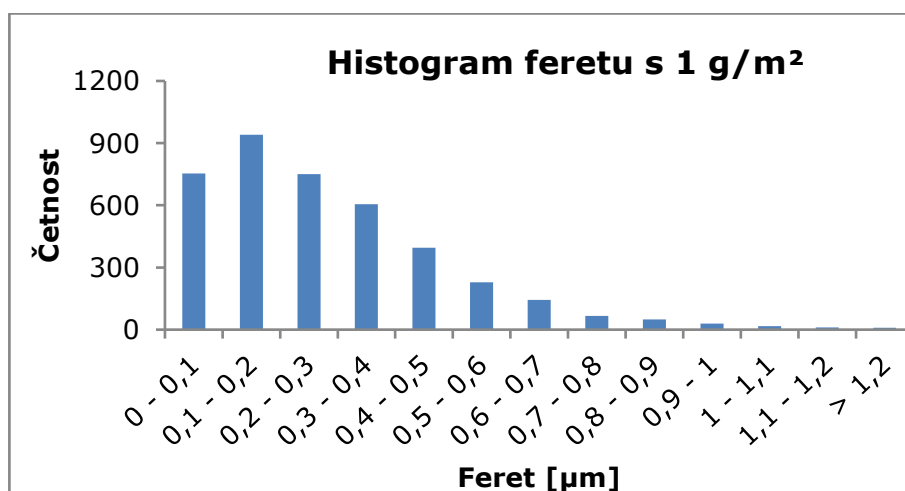
Vzorek 1

Tab. 6 Vzorek 1- Ekvivalentní a Feretův průměr

| | Ekvivalentní průměr | Feret |
|----------------------------|---------------------|--------|
| Průměr | 0,2448 | 0,2863 |
| Počet | 4000 | 4000 |
| Min | 0,05 | 0,04 |
| Max | 1,2 | 1,375 |
| Směrodatná odchylka | 0,1702 | 0,2089 |

Tab. 7 Vzorek 1 – četnost ekvivalentního a Feretova průměru pórů

| Rozmezí binu [μm] | Četnost ekvivalentních průměrů | Četnost Feretu |
|--------------------------------|--------------------------------|----------------|
| 0,0 - 0,1 | 920 | 754 |
| 0,1 - 0,2 | 1091 | 941 |
| 0,2 - 0,3 | 824 | 750 |
| 0,3 - 0,4 | 550 | 606 |
| 0,4 - 0,5 | 300 | 395 |
| 0,5 - 0,6 | 151 | 229 |
| 0,6 - 0,7 | 72 | 144 |
| 0,7 - 0,8 | 44 | 67 |
| 0,8 - 0,9 | 27 | 49 |
| 0,9 - 1,0 | 13 | 29 |
| 1,0 - 1,1 | 4 | 17 |
| 1,1 - 1,2 | 4 | 10 |
| > 1,2 | 0 | 9 |



Graf 1 Histogram Vzorek 1 – závislost velikosti Feretova průměru pórů na četnosti

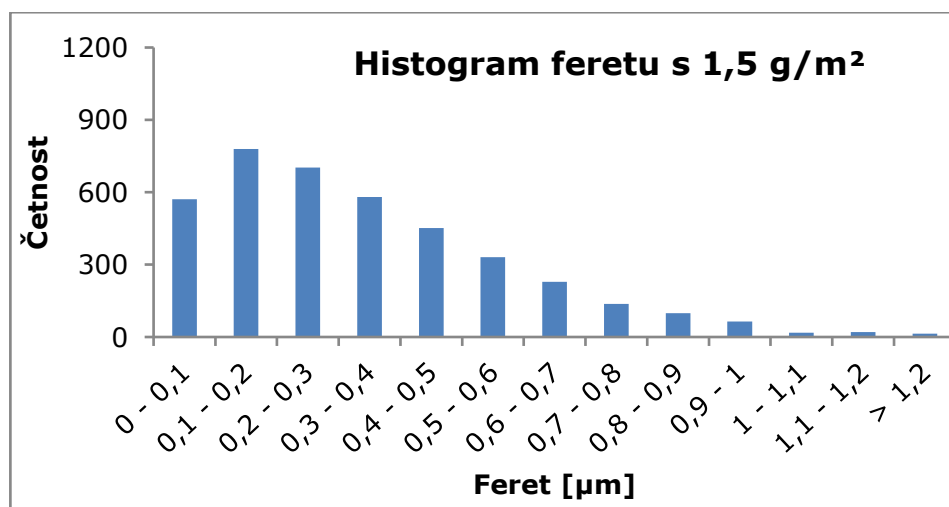
Vzorek 1,5

Tab. 8 Vzorek 1,5 - Ekvivalentní a Feretův průměr

| | ekvivalentní průměr | feret |
|----------------------------|---------------------|--------|
| Průměr | 0,2884 | 0,3434 |
| Počet | 4000 | 4000 |
| Min | 0,05 | 0,04 |
| Max | 1,26 | 1,5 |
| Směrodatná odchylka | 0,1933 | 0,2400 |

Tab. 9 Vzorek 1,5 – četnost ekvivalentního a Feretova průměru pórů

| rozmezí binu [μm] | Četnost ekvivalentních průměrů | Četnost feretu |
|--------------------------------|--------------------------------|----------------|
| 0,0 - 0,1 | 689 | 571 |
| 0,1 - 0,2 | 979 | 780 |
| 0,2 - 0,3 | 795 | 702 |
| 0,3 - 0,4 | 567 | 581 |
| 0,4 - 0,5 | 439 | 452 |
| 0,5 - 0,6 | 225 | 331 |
| 0,6 - 0,7 | 151 | 229 |
| 0,7 - 0,8 | 84 | 137 |
| 0,8 - 0,9 | 33 | 99 |
| 0,9 - 1,0 | 22 | 64 |
| 1,0 - 1,1 | 10 | 18 |
| 1,1 - 1,2 | 2 | 21 |
| > 1,2 | 3 | 14 |



Graf 2 Histogram Vzorek 1,5 – závislost velikosti Feretova průměru pórů na četnosti

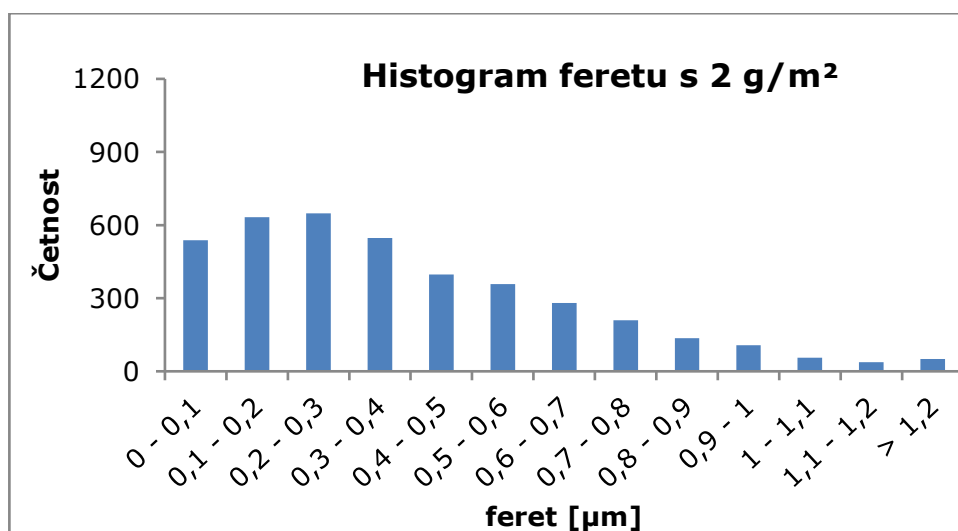
Vzorek 2

Tab. 10 Vzorek 2 - Ekvivalentní a Feretův průměr

| | ekvivalentní průměr | feret |
|----------------------------|---------------------|--------|
| Průměr | 0,3300 | 0,3963 |
| Počet | 4000 | 4000 |
| Min | 0,05 | 0,04 |
| Max | 1,54 | 1,62 |
| Směrodatná odchylka | 0,2319 | 0,2843 |

Tab. 11 Vzorek 2 – četnost ekvivalentního a Feretova průměru pórů

| rozmezí binu [μm] | Četnost ekvivalentních průměrů | Četnost feretu |
|--------------------------------|--------------------------------|----------------|
| 0,0 - 0,1 | 654 | 538 |
| 0,1 - 0,2 | 813 | 633 |
| 0,2 - 0,3 | 721 | 648 |
| 0,3 - 0,4 | 553 | 547 |
| 0,4 - 0,5 | 436 | 398 |
| 0,5 - 0,6 | 310 | 358 |
| 0,6 - 0,7 | 210 | 281 |
| 0,7 - 0,8 | 137 | 209 |
| 0,8 - 0,9 | 70 | 136 |
| 0,9 - 1,0 | 40 | 107 |
| 1,0 - 1,1 | 25 | 56 |
| 1,1 - 1,2 | 20 | 38 |
| > 1,2 | 10 | 50 |



Graf 3 Histogram Vzorek 2 – závislost velikosti Feretova průměru pórů na četnosti

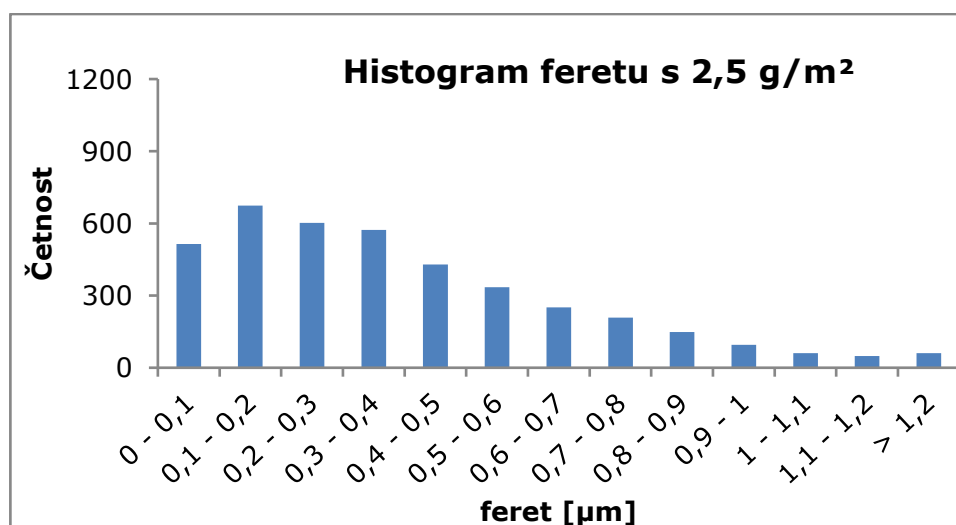
Vzorek 2,5

Tab. 12 Vzorek 2,5 - Ekvivalentní a Feretův průměr

| | ekvivalentní průměr | feret |
|----------------------------|---------------------|--------|
| Průměr | 0,3340 | 0,4006 |
| Počet | 4000 | 4000 |
| Min | 0,05 | 0,04 |
| Max | 1,88 | 2,01 |
| Směrodatná odchylka | 0,2389 | 0,2940 |

Tab. 13 Vzorek 2,5 – četnost ekvivalentního a Feretova průměru pórů

| rozezí binu [μm] | Četnost ekvivalentních průměrů | Četnost feretu |
|-------------------------------|--------------------------------|----------------|
| 0,0 - 0,1 | 644 | 514 |
| 0,1 - 0,2 | 804 | 674 |
| 0,2 - 0,3 | 739 | 602 |
| 0,3 - 0,4 | 559 | 573 |
| 0,4 - 0,5 | 415 | 429 |
| 0,5 - 0,6 | 311 | 335 |
| 0,6 - 0,7 | 202 | 251 |
| 0,7 - 0,8 | 147 | 208 |
| 0,8 - 0,9 | 73 | 149 |
| 0,9 - 1,0 | 43 | 95 |
| 1,0 - 1,1 | 19 | 60 |
| 1,1 - 1,2 | 15 | 48 |
| > 1,2 | 28 | 61 |



Graf 4 Histogram Vzorek 2,5 – závislost velikosti Feretova průměru pórů na četnosti

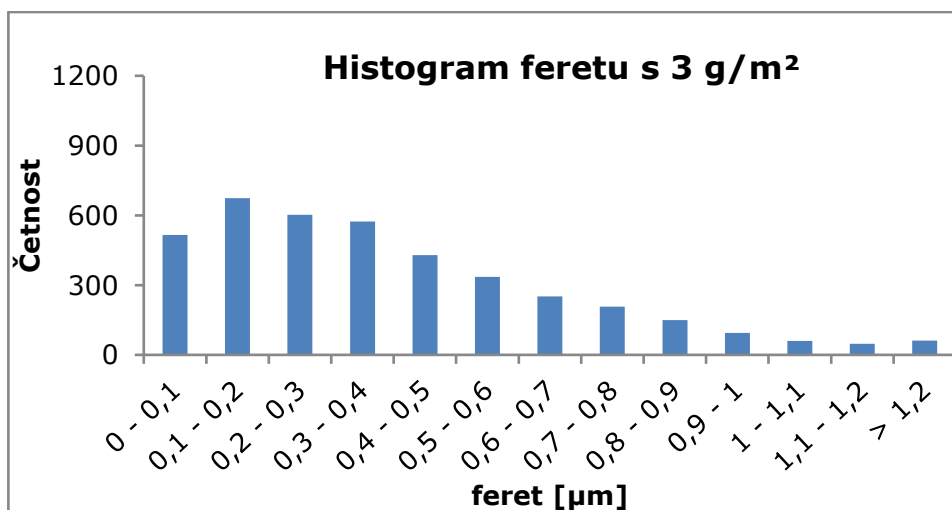
Vzorek 3

Tab. 14 Vzorek 3 - Ekvivalentní a Feretův průměr

| | ekvivalentní průměr | feret |
|----------------------------|---------------------|--------|
| Průměr | 0,3340 | 0,4006 |
| Počet | 4000 | 4000 |
| Min | 0,05 | 0,04 |
| Max | 1,08 | 2,01 |
| Směrodatná odchylka | 0,2389 | 0,2940 |

Tab. 15 Vzorek 3 – četnost ekvivalentního a Feretova průměru pórů

| rozsah binu [μm] | Četnost ekvivalentních průměrů | Četnost feretu |
|-------------------------------|--------------------------------|----------------|
| 0,0 - 0,1 | 645 | 515 |
| 0,1 - 0,2 | 804 | 674 |
| 0,2 - 0,3 | 739 | 602 |
| 0,3 - 0,4 | 559 | 573 |
| 0,4 - 0,5 | 415 | 429 |
| 0,5 - 0,6 | 311 | 335 |
| 0,6 - 0,7 | 202 | 251 |
| 0,7 - 0,8 | 147 | 208 |
| 0,8 - 0,9 | 73 | 149 |
| 0,9 - 1,0 | 43 | 95 |
| 1,0 - 1,1 | 19 | 60 |
| 1,1 - 1,2 | 15 | 48 |
| > 1,2 | 28 | 61 |



Graf 5 Histogram Vzorek 3 – závislost velikosti Feretova průměru pórů na četnosti

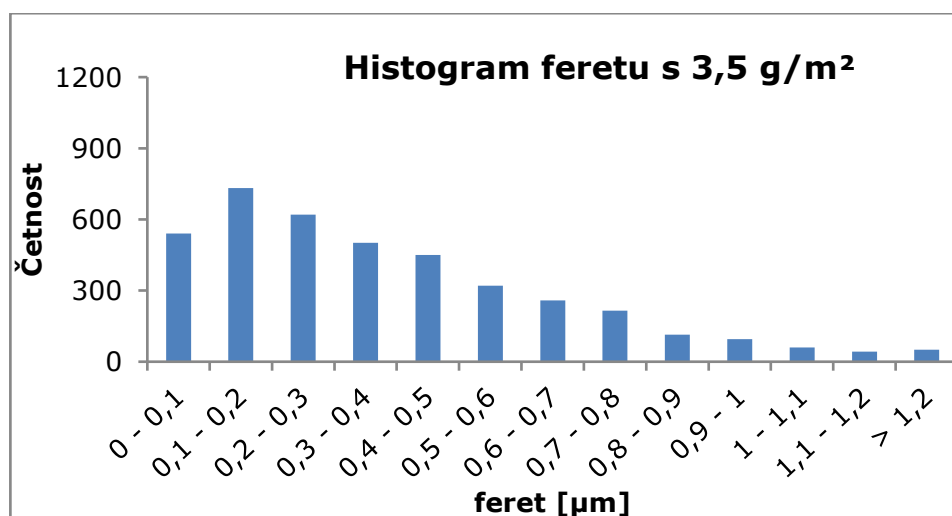
Vzorek 3,5

Tab. 16 Vzorek 3,5 - Ekvivalentní a Feretův průměr

| | ekvivalentní průměr | feret |
|----------------------------|---------------------|--------|
| Průměr | 0,3229 | 0,3873 |
| Počet | 4000 | 4000 |
| Min | 0,05 | 0,04 |
| Max | 1,7 | 2,06 |
| Směrodatná odchylka | 0,2298 | 0,2843 |

Tab. 17 Vzorek 3,5 – četnost ekvivalentního a Feretova průměru pórů

| rozmezí binu [μm] | Četnost ekvivalentních průměrů | Četnost feretu |
|--------------------------------|--------------------------------|----------------|
| 0,0 - 0,1 | 695 | 541 |
| 0,1 - 0,2 | 844 | 732 |
| 0,2 - 0,3 | 707 | 620 |
| 0,3 - 0,4 | 553 | 502 |
| 0,4 - 0,5 | 403 | 450 |
| 0,5 - 0,6 | 295 | 320 |
| 0,6 - 0,7 | 214 | 259 |
| 0,7 - 0,8 | 114 | 215 |
| 0,8 - 0,9 | 81 | 114 |
| 0,9 - 1,0 | 43 | 95 |
| 1,0 - 1,1 | 30 | 60 |
| 1,1 - 1,2 | 14 | 42 |
| > 1,2 | 7 | 50 |



Graf 6 Histogram Vzorek 3,5 – závislost velikosti Feretova průměru pórů na četnosti

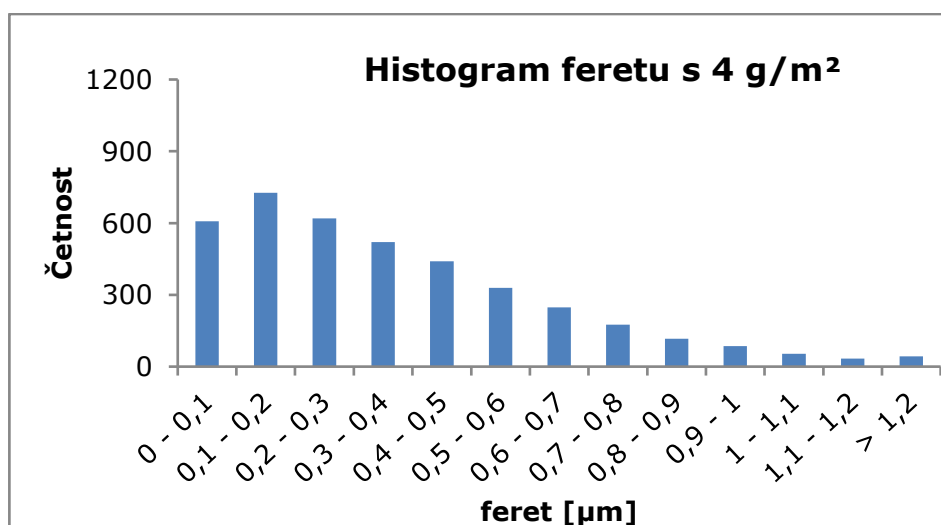
Vzorek 4

Tab. 18 Vzorek 4 - Ekvivalentní a Feretův průměr

| | ekvivalentní průměr | feret |
|----------------------------|---------------------|--------|
| Průměr | 0,3113 | 0,3719 |
| Počet | 4000 | 4000 |
| Min | 0,05 | 0,04 |
| Max | 1,69 | 1,815 |
| Směrodatná odchylka | 0,2261 | 0,2777 |

Tab. 19 Vzorek 4 – četnost ekvivalentního a Feretova průměru pórů

| rozmezí binu [μm] | Četnost ekvivalentních průměrů | Četnost feretu |
|--------------------------------|--------------------------------|----------------|
| 0,0 - 0,1 | 741 | 607 |
| 0,1 - 0,2 | 888 | 727 |
| 0,2 - 0,3 | 694 | 619 |
| 0,3 - 0,4 | 554 | 521 |
| 0,4 - 0,5 | 414 | 440 |
| 0,5 - 0,6 | 257 | 329 |
| 0,6 - 0,7 | 188 | 248 |
| 0,7 - 0,8 | 117 | 176 |
| 0,8 - 0,9 | 71 | 117 |
| 0,9 - 1,0 | 35 | 86 |
| 1,0 - 1,1 | 20 | 53 |
| 1,1 - 1,2 | 6 | 33 |
| > 1,2 | 14 | 43 |



Graf 7 Histogram Vzorek 4 – závislost velikosti

Feretova průměru pórů na četnosti

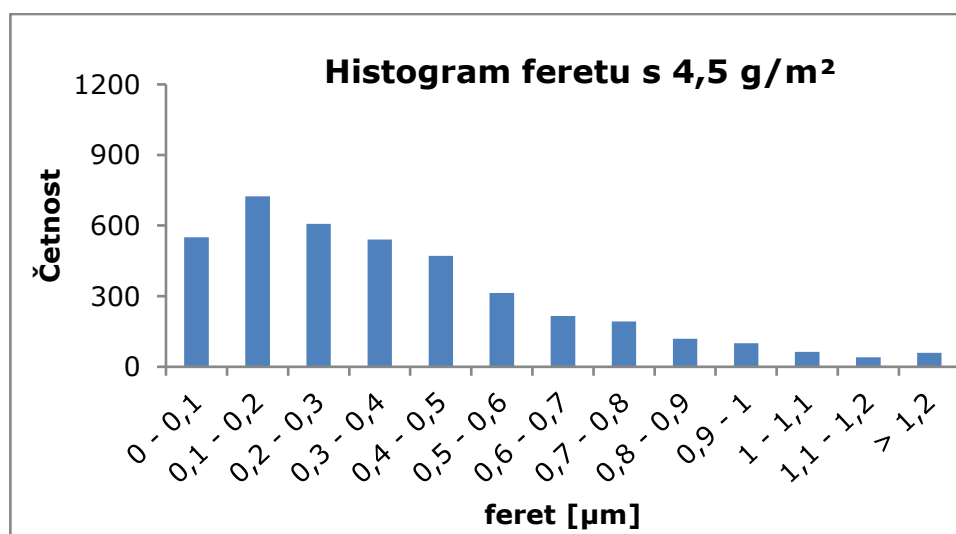
Vzorek 4,5

Tab. 20 Vzorek 4,5 - Ekvivalentní a Feretův průměr

| | ekvivalentní průměr | feret |
|----------------------------|---------------------|--------|
| Průměr | 0,3193 | 0,3854 |
| Počet | 4000 | 4000 |
| Min | 0,05 | 0,04 |
| Max | 1,61 | 1,83 |
| Směrodatná odchylka | 0,2286 | 0,2868 |

Tab. 21 Vzorek 4,5 – četnost ekvivalentního a Feretova průměru pórů

| rozezí binu [μm] | Četnost ekvivalentních průměrů | Četnost feretu |
|-------------------------------|--------------------------------|----------------|
| 0,0 - 0,1 | 689 | 551 |
| 0,1 - 0,2 | 846 | 725 |
| 0,2 - 0,3 | 724 | 608 |
| 0,3 - 0,4 | 588 | 541 |
| 0,4 - 0,5 | 408 | 471 |
| 0,5 - 0,6 | 273 | 313 |
| 0,6 - 0,7 | 183 | 216 |
| 0,7 - 0,8 | 117 | 193 |
| 0,8 - 0,9 | 70 | 119 |
| 0,9 - 1,0 | 47 | 100 |
| 1,0 - 1,1 | 33 | 63 |
| 1,1 - 1,2 | 11 | 40 |
| > 1,2 | 10 | 59 |



Graf 8 Histogram Vzorek 4,5 – závislost velikosti Feretova průměru pórů na četnosti

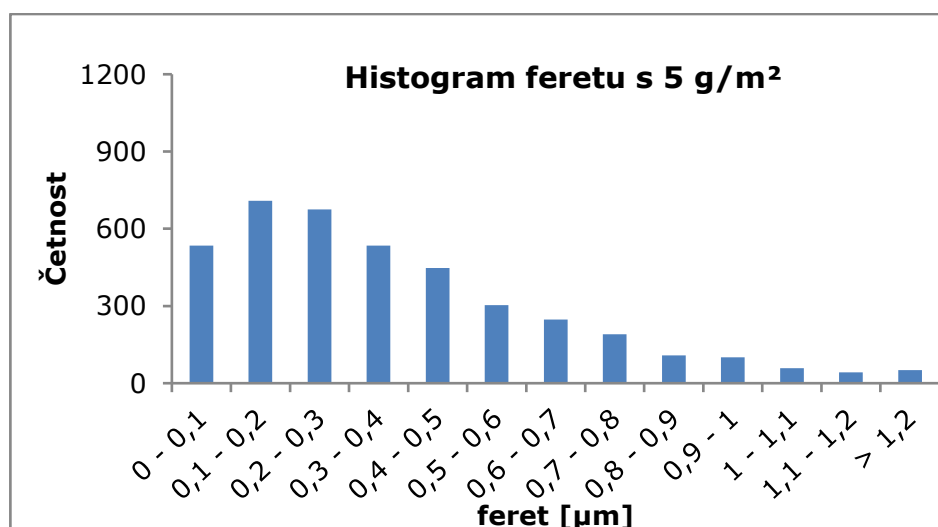
Vzorek 5

Tab. 22 Vzorek 5 - Ekvivalentní a Feretův průměr

| | ekvivalentní průměr | feret |
|----------------------------|---------------------|--------|
| Průměr | 0,3201 | 0,3835 |
| Počet | 4000 | 4000 |
| Min | 0,05 | 0,04 |
| Max | 1,6 | 1,93 |
| Směrodatná odchylka | 0,2278 | 0,2822 |

Tab. 23 Vzorek 5 – četnost ekvivalentního a Feretova průměru pórů

| rozmezí binu [μm] | Četnost ekvivalentních průměrů | Četnost feretu |
|--------------------------------|--------------------------------|----------------|
| 0,0 - 0,1 | 657 | 535 |
| 0,1 - 0,2 | 863 | 709 |
| 0,2 - 0,3 | 763 | 675 |
| 0,3 - 0,4 | 555 | 534 |
| 0,4 - 0,5 | 411 | 447 |
| 0,5 - 0,6 | 276 | 303 |
| 0,6 - 0,7 | 191 | 247 |
| 0,7 - 0,8 | 107 | 190 |
| 0,8 - 0,9 | 73 | 108 |
| 0,9 - 1,0 | 53 | 100 |
| 1,0 - 1,1 | 29 | 58 |
| 1,1 - 1,2 | 11 | 42 |
| > 1,2 | 10 | 51 |



Graf 9 Histogram Vzorek 5 – závislost velikosti

Feretova průměru pórů na četnosti

Tab. 24 Hodnoty ekvivalentního průměru

| Vzorky: | Ekvivalentní průměr | | |
|------------|--|-------------|----------------------|
| | Plošná hmotnost [g/m ²] | Průměr [μm] | St. Odchylka [μm] |
| Vzorek 1 | 1 | 0,24 | 0,17 |
| Vzorek 1,5 | 1,5 | 0,28 | 0,19 |
| Vzorek 2 | 2 | 0,33 | 0,23 |
| Vzorek 2,5 | 2,5 | 0,33 | 0,23 |
| Vzorek 3 | 3 | 0,33 | 0,23 |
| Vzorek 3,5 | 3,5 | 0,32 | 0,23 |
| Vzorek 4 | 4 | 0,31 | 0,22 |
| Vzorek 4,5 | 4,5 | 0,32 | 0,23 |
| Vzorek 5 | 5 | 0,32 | 0,23 |

Tab. 25 Hodnoty maximálního Feretu

| Vzorky: | Maximální feret | | |
|------------|--|-------------|----------------------|
| | Plošná hmotnost [g/m ²] | Průměr [μm] | St. Odchylka [μm] |
| Vzorek 1 | 1 | 0,37 | 0,28 |
| Vzorek 1,5 | 1,5 | 0,44 | 0,31 |
| Vzorek 2 | 2 | 0,53 | 0,39 |
| Vzorek 2,5 | 2,5 | 0,52 | 0,39 |
| Vzorek 3 | 3 | 0,52 | 0,39 |
| Vzorek 3,5 | 3,5 | 0,51 | 0,38 |
| Vzorek 4 | 4 | 0,49 | 0,37 |
| Vzorek 4,5 | 4,5 | 0,51 | 0,39 |
| Vzorek 5 | 5 | 0,5 | 0,38 |

Tab. 26 Hodnoty minimálního Feretu

| Vzorky: | Minimální feret | | |
|------------|--|----------------|----------------------|
| | Plošná hmotnost [g/m ²] | Průměr [μm] | St. Odchylka [μm] |
| Vzorek 1 | 1 | 0,19 | 0,14 |
| Vzorek 1,5 | 1,5 | 0,23 | 0,16 |
| Vzorek 2 | 2 | 0,26 | 0,2 |
| Vzorek 2,5 | 2,5 | 0,26 | 0,2 |
| Vzorek 3 | 3 | 0,26 | 0,2 |
| Vzorek 3,5 | 3,5 | 0,26 | 0,2 |
| Vzorek 4 | 4 | 0,25 | 0,2 |
| Vzorek 4,5 | 4,5 | 0,26 | 0,2 |
| Vzorek 5 | 5 | 0,26 | 0,2 |

Tab. 27 Počty pórů

| Vzorky: | Počet pórů | | |
|------------|--|-------------|-------------------|
| | Plošná hmotnost [g/m ²] | Průměr [μm] | St. Odchylka [μm] |
| Vzorek 1 | 1 | 1338,8 | 123,31 |
| Vzorek 1,5 | 1,5 | 1167,2 | 52,2 |
| Vzorek 2 | 2 | 941,8 | 67,8 |
| Vzorek 2,5 | 2,5 | 909,6 | 119,77 |
| Vzorek 3 | 3 | 909,6 | 119,77 |
| Vzorek 3,5 | 3,5 | 913,8 | 36,6 |
| Vzorek 4 | 4 | 978,2 | 78,72 |
| Vzorek 4,5 | 4,5 | 952 | 57,02 |
| Vzorek 5 | 5 | 940 | 120,14 |