



Teoretická a experimentální analýza struktury a vlastností polopropustných membrán pro oděvní účely

Disertační práce

Studijní program: P3106 – Textilní inženýrství
Studijní obor: 3106V008 – Textilní technika

Autor práce: **Ing. Roman Knížek**
Vedoucí práce: prof. RNDr. Oldřich Jirsák, CSc.



The Theoretical and Experimental Analysis of the Structure and Properties of Semipermeable Membranes for Clothing

Dissertation

Study programme: P3106 – Textile Engineering

Study branch: 3106V008 – Textile technics

Author: **Ing. Roman Knížek**

Supervisor: prof. RNDr. Oldřich Jirsák, CSc.



Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační 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 disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační 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.

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

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

Datum:

Podpis:

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat prof. RNDr. Oldřichu Jirsákovi, CSc., doc. Ing. Vladimíru Bajzíkovi Ph.D. a prof. Ing. Jakubu Wienerovi, Ph.D. za odborné vedení a cennou pomoc při zpracování této disertační práce. Dále paní Ing. Koškové z firmy Interlana za pomoc při laminování, Bc. Filipu Sanetníkovi za pomoc při experimentech a firmě Svitap J.H.J. spol. s r.o. za průmyslovou realizaci tohoto projektu. Také bych chtěl poděkovat rodině a své přítelkyni za trpělivost, toleranci a lásku.

Anotace

Cílem disertační práce je vývoj nanovláknenné membrány pro sportovní a outdoorové oblečení za účelem zvýšení komfortních vlastností těchto oděvů. Jedná se především o vytvoření nanovláknenné membrány s vysokou paropropustností, nízkou prodyšností a vysokou hydrostatickou odolností. Nanovláknenná membrána je vyrobena z polyamidu 6 pomocí elektrostického zvláknění, následně hydrofobně upravena pro získání vysoké hydrostatické odolnosti a poté laminována s vrchovým materiálem anebo podšívkovým. Byly vytvořeny dvou a třívrstvé lamináty, které chrání nanovláknennou membránu před poškozením a zároveň je možné z těchto laminátů vytvořit finální oděv. Dále bylo prokázáno, že pro docílení vysoké hydrostatické odolnosti nestačí pouze povrchová hydrofobní úprava nanovláknenné membrány, ale je nutné, aby hydrofobní prostředek pronikl do celé struktury nanovláknenné vrstvy. Z experimentů plyne, že měření kontaktního úhlu smáčení není vhodným ukazatelem pro stanovení hydrofobnosti nanovláknenné membrány pro oděvy. Tato práce se detailně zabývá různými možnostmi hydrofobizace a laminace nanovláknenných vrstev, včetně průniku aditiva do samotné nanovláknenné vrstvy a následným sledováním komfortních vlastností nanovláknenné membrány. Jedná se o první reálnou aplikaci nanovláknenné vrstvy pro oděvní účely.

Klíčová slova: nanovláknenná membrána, laminace, hydrostatická odolnost, Nanospider

Annotation

The goal of this dissertation work is the development of a nanofiber membrane for outdoor and sports clothing to increase their comfort properties. Our main task was the creation of a nanofiber membrane with high steam permeability, low breathability and high hydrostatic resistance. The nanomembrane was made from polyamide 6 by electrospinning, after that, hydrophobic treatment was applied to gain high hydrostatic resistance and finally it was laminated with either the top fabric or with the lining fabric. Two- and three-layer laminates were created which protect the nanofiber membrane from damage and at the same time are suitable for creating the final clothing. It was proven that hydrophobic treatment applied only to the surface of the nanofiber membrane is insufficient for high hydrostatic resistance. It is necessary that the hydrophobic additive penetrates the whole structure of the membrane. Our experiments show that contact angle measurements are not a suitable parameter for determining the hydrophobic properties of nanofiber membranes. This dissertation looks in detail at various possibilities for hydrophobic treatment and lamination of nanofiber layers including the penetration of the nanofiber layer by the hydrophobic additive and at the comfort properties of the final nanofiber membrane. This is the first real use of a nanofiber membrane in the clothing industry.

Keywords: nanofiber membrane, lamination, hydrostatic resistance, Nanospider

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol, zkratka	Název	Jednotka
D_p	difúzní koeficient	[Kg/m.s.Pa]
Ret	výparný odpor	[m ² .Pa/W]
MVTR	rychlost prostupu vodní páry	[g/m ² /24 hod]
Q	tepelný tok	[W.m ⁻²]
M	hmotnost	[kg]
d	délka	[m]
t	teplota	[°C]
Q	množství tepla	[J]
τ	čas	[s]
α	součiniteli přestupu tepla	[W. m ⁻² .K ⁻¹]
\dot{q}	hustota tepelného toku	[W.m ⁻²]
t _s	teplota stěny	[°C]
t _t	teplota tekutiny	[°C]
v	kinematická viskozita	[m ² /s]
μ	dynamická viskozita	[Ns/m ²]
ρ	hustota	[g/m ³]
η	dynamická viskozita tekutin	[Ns/m ²]
P _k	parciální tlak na povrchu kůže	[Pa]
p _o	parciální tlak okolí	[Pa]
m^*	vteřinové množství páry	[Kg/m ² .s]
q_o	plošná hustota tepelného toku prcházející měřenou hlavicí nezakrytou měřeným vzorkem	[W.m ⁻²]
q_v	plošná hustota tepelného toku prcházející měřenou hlavicí zakrytou měřeným vzorkem	[W.m ⁻²]
L	výparné teplo vody	[kJ/mol]

S	kolmý průřez	[m ²]
U	napětí	[kV]
RAF	royal flying corps	
PTFE	polytetrafluorethylen	
PU	polyuretan	
PES	polyester	
DMF	dimethylformamid	
PAN	polyakrylonitril	
POP	polypropylen	
\bar{M}	molekulová hmotnost	
m	odpar vlhkosti z povrchu kůže	
λ	konstanta úměrnosti	
w	střední rychlost tekutiny v kanálu	
Re	Reynoldsova čísla	
Pr	Prandtlovo číslo	
α_k	součinitel přestupu tepla konvekcí	
c	měrná tepelná kapacita	
χ	charakter proudění tekutiny	
ϕ	tvar přenosového povrchu	
Nu	Nusseltovo číslo	
Gr	Grashofovo číslo	
C	konstanta	
ξ	tortusita	
R_{WF}	odpor přenosu vodní páře	
R_{Wp}	odpor proti průchodu vodní páry v porézním prostředí	
ZnO	oxid zinečnatý	
TiO ₂	oxid titaničitý	
PCL	polykaprolaktam	

PVDF	polyvinylidenefluoride
PDA	polydopaminem
PDMS	polydimethylsiloxane
CNF	uhlíková vlákna
TPU	termoplastický polyuretan
H_0	hypotéza
CO	bavlna

Obsah

ÚVOD	14
1 PŘEDMĚT A CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE	15
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY	16
3 KOMFORT TEXTILIÍ	19
3.1 Propustnost textilií pro vodní páry	19
3.1.1 Kapalná vlhkost	20
3.1.2 Přenos tepla a vlhkosti	21
3.1.3 Difúze	28
3.1.4 Stanovení relativní propustnosti pro vodní páry	30
3.2 Propustnost textilií pro vzduch	31
3.2.1 Prodyšnost	31
3.3 Hydrostatická odolnost textilií	31
3.4 Vrstvené oblékání	32
3.4.1 Transportní vrstva	34
3.4.2 Izolační vrstva	35
3.4.3 Ochranná vrstva	36
3.4.4 Kombinovaná vrstva	36
3.5 Počty vrstev dle klimatických podmínek	36
4 PŘEHLED PRŮMYSLOVĚ VYRÁBĚNÝCH MEMBRÁN	38
4.1 Přehled současného stavu nanovlákných membrán	39
4.1.1 Analýza současného stavu problematiky nanovlákných membrán	42
5 PŘEHLED KROKŮ K VÝVOJI NANOVLÁKENNÉ MEMBRÁNY	44
5.1 Výroba nanovlákné vrstvy	44
5.1.1 Historie elektrostatického zvlákňování	44
5.1.2 Princip elektrostatického zvlákňování	45
5.1.3 Nanospider	46
5.1.4 Spin Line 120	46

5.1.5	Odstředivé zvlákňování	47
5.2	Suroviny pro výrobu nanovlákných membrán.....	48
5.2.1	Polyuretany.....	48
5.2.2	Současný stav výroby nanovlákných membrán z PU.....	52
5.2.3	Polyamid 6.....	52
5.2.4	Současný stav výroby nanovlákných membrán z PA 6.....	53
5.3	Hydrofobizace nanovlákné vrstvy	54
5.3.1	Hydrofobní úprava	54
5.3.2	Chemické látky používané pro hydrofobizaci.....	56
5.3.3	Fluorkarbonové úpravy	57
5.4	Plazma	58
5.4.1	Atmosférická vs. nízkovakuová plazma.....	59
5.4.2	Nízkovakuová plazma typu roll-to-roll	60
5.4.3	Hydrofobní úprava textilních povrchů pomocí plasmy.....	61
5.4.4	Rešerše aktuálního stavu zvyšování hydrofobity nanovlákných vrstev	61
5.5	Laminace	64
5.5.1	Dvouvrstvý laminát	64
5.5.2	Dvouvrstvý laminát s volnou podšívkou.....	65
5.5.3	Dvou a půlvrstvý laminát	65
5.5.4	Třívrstvý laminát	66
5.5.5	Volně vložená membrána (Z-liner)	67
5.6	Nánosování	67
5.7	Podlepování	71
5.7.1	Diskontinuální podlepovací stroje.....	71
5.7.2	Kombinace nánosování a podlepování.....	72
5.8	Rešerše aktuálního stavu laminace nanovlákných vrstev	73
6	ANALÝZA VÝROBY NANOVLÁKNÉ MEMBRÁNY.....	76

6.1	Popis použitých metod pro vyhodnocení komfortních vlastností	76
6.1.1	Zjišťování paropropustnosti	76
6.1.2	Zjišťování prodyšnosti	77
6.1.3	Stanovení odolnosti proti pronikání vody – hydrostatická odolnost.....	78
6.1.4	Zjišťování hydrofobity - Spray test	78
6.1.5	Stanovení úhlu smáčení.....	79
6.1.6	Odolnost vůči opakovanému praní.....	79
6.1.7	Statistické vyhodnocení dat.....	80
6.2	Výroba nanovlákněné vrstvy	81
6.2.1	Polymerní roztok PU	81
6.2.2	Polymerní roztok PA 6	82
6.3	Podkladová textilie	82
6.4	Výroba nanovlákněných membrán	84
6.5	Hydrofobizace nanovlákněné vrstvy	88
6.5.1	Nánosování hydrofobizačního prostředku pomocí fuláru	89
6.5.2	Zvýšení hydrofobity pomocí postřiku	99
6.5.3	Zvýšení hydrofobity pomocí nízkovakuové plazmy	101
6.6	Nánosování	104
6.6.1	Velikost a vzájemná vzdálenost bodů	105
6.6.2	Vytvoření třívrstvého laminátu	105
6.6.3	Kombinace nánosování a podlepování.....	107
7	VÝSLEDKY LAMINACE NANOVLÁKNĚNÉ MEMBRÁNY S TKANINOU	108
8	PLÁNOVANÝ EXPERIMENT	109
9	DISKUZE VÝSLEDKŮ	114
10	ZÁVĚR.....	117
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	118
	SEZNÁM OBRÁZKŮ.....	125
	SEZNÁM TABULEK	127
	SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA.....	129

CURRICULUM VITAE	132
PŘÍLOHY	134
Příloha č. 1: Statistická analýza vlivu konstrukce použitého materiálu na komfortní vlastnosti.....	135
Příloha č. 2: Statistická analýza dosažených výsledků.....	138
Příloha č. 3: Protokol z Hohenstein institute	154

Úvod

Prvotní funkcí oděvu byla ochrana člověka před povětrnostními vlivy. Později k tomu přistoupila, někdy převážila např. funkce společenská, avšak základní požadavek, tj. ochrana člověka před povětrnostními vlivy, byl v řadě případů zachován. Tato základní funkce oděvu je požadována i v současnosti. V posledních dvou desetiletích s vývojem nových materiálů a se zvyšujícím se důrazem na bezpečnost a ochranu zaměstnanců při práci a na ochranu lidí při outdoorových volnočasových aktivitách se stal výzkum v oblasti komfortu textilií a oděvů jedním z nejdůležitějších. Pomocí klasických výrobních postupů, klasických přírodních vláken a klasických finálních úprav již dnes nelze vyrobit dostatečně komfortní oděvy vyhovující posledním trendům. V oděvním průmyslu tak nastupují nové materiály, vlákna a technologie, které dávají oděvním výrobkům nové vlastnosti a zvyšují tak komfort uživatele.

Příkladem mohou být moderní svrchní oděvy vybavené membránou různého typu a složením určeným pro outdoorové, případně i jiné aktivity. Nejenom, že musí odolávat větru, dešti, sněhu či jiným povětrnostním vlivům, ale musí být také dostatečně paropropustné. Samotné nároky na hydrostatickou odolnost, nebo-li výšku vodního sloupce, se zvyšují a můžeme se dnes setkat i s hodnotami převyšujícími 20 000 mm.

Nejen membrány, které se používají například na zimní bundy, zvyšují komfort uživatele, ale jsou to i materiály využívané na výrobu funkčního prádla a další produkty s přidanou hodnotou. Všechny tyto produkty mají jeden společný prvek – umí něco nového a rozšiřují svou funkčnost. Známa zásada je, že „neexistuje špatné počasí, ale jen špatně oblečený člověk“.

1 Předmět a cíl disertační práce

Na základě literární rešerše a dosažených výsledků různých autorů a průzkumu trhu v oblasti nanovlákných membrán můžeme konstatovat důležitost a nutnost aplikace nanovlákné membrány pro sportovní, outdoorové a armádní účely, neboť se stále zvyšují požadavky nejen na vyšší komfortní vlastnosti.

V dnešní době existuje nepřehledné množství výrobců membrán pro oděvní účely, ať už se jedná o hydrofilní či hydrofobní membrány, avšak prakticky neexistuje téměř žádný výrobce na světě, který by aplikoval nanovláknou membránu do oděvu. Vědecká pracoviště dle literární rešerše sice vyvinula řadu nanovlákných membrán určených pro oděvy, avšak nanovlákné membrány nemohou v oděvu existovat samostatně a je nutné takovéto membrány slaminovat s vhodným textilním materiálem, ať už s tkaninou či s pleteninou.

Studie výzkumů ukazují, že si nanovlákné membrány zaslouží hlubší analýzu. Především je nutné se zaměřit na další zpracování nanovlákné membrány tak, aby mohl vzniknout plnohodnotný oděv využívající právě nanovláknou vrstvu. Většina prací, jak již bylo uvedeno, se zabývá pouze vyvinutím nanovlákné membrány, avšak už nedochází k dalšímu výzkumu a vývoji potřebnému k tomu, aby mohl vzniknout laminát, který se může dále zpracovávat.

Výzkumy se dále nezabývají zvyšováním hydrostatické odolnosti nanovlákné membrány, nebo-li výšky vodního sloupce, který je jedním z důležitých kritérií pro sportovní, outdoorové a armádní oblečení.

Základním cílem této práce je vyvinutí zcela nové nanovlákné membrány s vhodnými komfortními vlastnostmi a vytvoření laminátu s využitím právě nově vyvinuté nanovlákné membrány.

Předložená disertační práce si proto klade za cíl:

- vyvinout nanovláknou membránu pro oděvní účely
- vytvořit vhodný dvou a třívrstvý laminát s využitím nanovlákné membrány

2 Přehled současného stavu problematiky

Oděvy pro sportovní, outdoorové či armádní účely bez membrány by v dnešní době nemohly prakticky existovat. Důvodem je stále zvyšující se požadavek na komfortní vlastnosti, ať už se jedná o paropropustnost, hydrostatickou odolnost, větruodolnost, stálost v oděru či odolnost vůči praní či chemickému čištění.

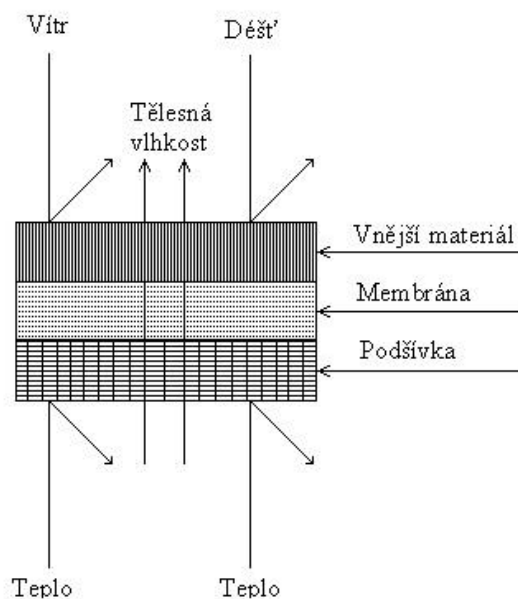
Historie outdoorového oblečení ovšem nezačíná vývojem membrány, ale bavlněnou tkaninou nazvanou Ventile pro britské letce RAF vyvinutou ve 40. letech 20. století vědci ze Shirley institutu v Manchesteru. Kombinéza z Ventile dokázala prodloužit dobu potřebnou pro přežití v ledovém oceánu z několika desítek sekund na 20 minut. Po zavedení výstroje přeživalo 80% protiponorkových pilotů, kteří museli přistát v moři.

Tkanina Ventile je prvním předchůdcem dnešních moderních nepromokavých textilií. Tkanina Ventile používá příze vyrobené z dlouhovlákněné bavlny. Dostava je až 98 nití/cm. Tkanina Ventile má o 30 % hustší vazbu než běžná tkanina. Pokud je vystavena působení vody, vlákna ji absorbují a zvětší svůj objem. Tím zcela uzavřou mezery v osnově i vpichy po jehle a zabrání tak dalšímu pronikání vody. Paropropustnost Ventile tkaniny je $\text{Ret } 3,3 \text{ Pa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$.

Membrány mají za úkol zvýšit naše pohodlí v oděvní textilií, ať už se jedná o bundu, kalhoty, rukavice či boty. Každý oděvní materiál má své limity, proto vkládáme mezi podšívkový (podšívka není podmínkou) a vrchní oděvní materiál membránu, abychom tyto limity navýšili a textilií udělali pro nositele pokud možno co nejvíce pohodlnou. Membrána má tři základní funkce: paropropustnost, nepromokavost a větruodolnost. Nepromokavost a větruodolnost jsou vlastnosti, kterých se dá poměrně „snadno“ docílit. Například klasická pláštěnka tyto dva předpoklady splňuje, ale už není schopna paropropustnosti a člověk se v takovéto textilií potí, a tudíž se jeho pohodlí minimalizuje. Proto světoví výrobci outdoorového oblečení používají membrány pro docílení těchto tří parametrů.

Na obr. 1 je vidět, jak taková membrána funguje. Na vrchní materiál padají kapky vody (sníh, déšť). Vrchní oděvní materiál se snaží zamezit proniknutí kapek vody pod textilií, protože i samotný vrchní materiál je velmi často naimpregnovaný a chemicky zušlechtěný, ale zároveň tak, aby byl paropropustný. Avšak tento vrchní materiál má své limity, proto bývá membrána zalaminována mezi vrchní materiál a podšívku. Membrána, která zvyšuje vodní sloupec, je větruodolná a především paropropustná. Může se též slaminovat pouze membrána s vrchním oděvním materiálem, a tím vznikne velmi lehká technická bunda. Je tedy zřejmé, že

nezáleží jen na kvalitě samotné membrány, ale i na samotném podšívkovém a vrchním oděvním materiálu. Též je potřeba používat funkční oblečení (spodní prádlo, mikina atd.), aby byl komfort pokud možno co nejlepší.



Obr. 1: Schéma funkce membrány

Membrány jsou vyráběny z polymerního materiálu, nejčastěji z PTFE, z PES nebo PUR. Tloušťka membrány se pohybuje řádově v jednotkách mikrometrů. V dnešní době se vyskytují na trhu dva druhy membrán[1]:

- a) mikroporézní
- b) hydrofilní

Paropropustnost versus prodyšnost

Velká většina veřejnosti, se domnívá, že paropropustnost a prodyšnost je jeden a ten samý termín. Příkladem může být i firma Gore-tex, která udává, že výrobky jsou velmi dobře prodyšné a zároveň píše, že výrobky od Gore-texu jsou 100 % větruodolné. A jaký je v tom tedy rozdíl?

Paropropustnost - je schopnost materiálu propouštět vodní páry (pot). Tedy prostup vodní páry přes spodní prádlo, triko, svetr či bundu od nositele do vnějšího prostředí. Je zřejmé, že všechny vyjmenované vrstvy oblečení musí být paropropustné, pokud se má nositel cítit v oděvu komfortně.

Prodyšnost - je schopnost materiálu propouštět vzduch. Tedy prostup vzduchu skrz oděvní systém, jako je spodní prádlo, triko, svetr či bundy z vnějšího prostředí k nositeli a

odvádění tepla, které vzniká při vysoké fyzické zátěži. Narozdíl od paropropustnosti, kde je potřeba, aby všechny vrstvy byly paropropustné, tak u prodyšnosti to neplatí. U spodního prádla, trika, svetru atd. je potřebné, aby byly prodyšné. Ovšem pokud by byla prodyšná např. vrchní bunda či kalhoty, tak by mohlo dojít např. v zimním období při silném a studeném větru k přestupu chladného vzduchu k nositeli, a to by mohlo ohrozit zdraví nositele.

3 Komfort textilií

V organismu člověka dochází neustále k procesu termoregulace. Pro lidský organismus nastává stav termofyziologického komfortu při teplotě pokožky 33-35°C a při nepřítomnosti vody na pokožce, dále pokud se relativní vlhkost vzduchu pohybuje v rozmezí 50±10%, rychlost proudění vzduchu je 25±10 cm/s. Optimální hodnoty komfortu oděvů výrazně ovlivňuje druh použitých materiálů.

Podle těchto hodnot můžeme pozorovat, že člověk se cítí komfortně pouze v malém rozsahu, co se teploty, relativní vlhkosti a proudění týče. Je tedy potřeba podle klimatických a dalších podmínek správně zvolit oděv tak, aby se člověk cítil komfortně [2].

3.1 Propustnost textilií pro vodní páry

Jak už bylo zmíněno v předešlé kapitole, pod pojmem paropropustnost myslíme přestup vodní páry (potu) skrz oděvní systém do okolního prostředí. Moderní outdoorové oblečení musí být velmi dobře paropropustné, v opačném případě by se náš organismus brzy nebezpečně přehřál a spodní oblečení by pod takovým neparopropustným oděvem zvlhlo naším vlastním potem.

Vlastnost materiálu převádět vodní páru (pot) do vnějšího prostředí udává MVTR (Moisture Vapor Transmission Rate, rychlost prostupu vodní páry) v [g/m²/24 hod], tedy kolik vlhkosti v gramech propustí 1m² látky za 24 hodin. Čím vyšší je hodnota, tím je materiál paropropustnější.

Další údaj vyjadřující paropropustnost je hodnota výparného odporu Ret [Pa.m²/W]. Zde to platí opačně oproti MVTR, tedy, čím menší hodnota (menší odpor), tím je materiál paropropustnější. V tab. 1 je uvedena klasifikace paropropustnosti látek v těchto jednotkách [2].

Tab. 1: Hodnotící tabulka výparného odporu

Ret < 6	velmi dobrá	nad 20 000 g/m ² .24 hod
Ret 6 - 13	dobrá	20 000 – 9 000 g/m ² .24 hod
Ret 13 - 20	uspokojivá	9 000 – 5 000 g/m ² .24 hod
Ret > 20	neuspokojivá	pod 5 000 g/m ² .24 hod

Měření paropropustnosti pomocí metody MVTR je v současné době nahrazováno objektivnější metodou Ret, neboť při měření nerespektuje teplotu a vlhkost vzduchu, a tak mohou být hodnoty MVTR zkresleny.

Dosáhnout dobré paropropustnosti u běžných textilních materiálů, jako je např. spodní prádlo, triko či svetr, není většinou problém, ale záleží na struktuře materiálu, materiálovém složení či jeho tloušťce atd. [1].

Velmi dobré paropropustnosti se dá dosáhnout i u bundy či kalhot, které navíc budou mít i velkou hydrostatickou odolnost. Aby to bylo možné, je potřeba použít bundu, kalhoty, rukavice atd., které budou obsahovat membránu. Dnes již není problém dosáhnout výšky vodního sloupce vyššího jak 20 000 mm a zároveň při Ret menším než $3 \text{ Pa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$. Opět to ale neznamená, že materiál vždy dokáže převést veškerou vlhkost do vnějšího prostředí. Zda materiál, ze kterého je oděv vyroben, přenesou téměř všechnu vlhkost, nebo nějaká vlhkost ve vrstvách oblečení zůstane, záleží především na relativní vlhkosti vzduchu, intenzitě zátěže a způsobu oblékání.

Spokojenost uživatele se schopností odvádět vodní páry z oděvu je ovlivněna řadou faktorů. Jednak závisí na produkci tělesných par v klidu a jednak při pohybové činnosti. I v klidovém stavu totiž probíhá tzv. nevnímané pocení v hodnotě kolem 50 ml/hod. Znamená to, že jen pro převod vlhkosti vyprodukované tělem v klidovém stavu je potřeba materiál s parametrem 1200 - 1500 g/m^2 za 24 hod. K objemu vyprodukovaných par při klidovém pocení se pak přičítají tělesné páry vzniklé při zátěži. V tab. 2 jsou uvedeny přibližné hodnoty produkce tělesných výparů podle intenzity zátěže [1].

Tab. 2: Hodnoty produkce tělesných výparů podle intenzity zátěže

chůze	5 000-10 000 g/m^2 za 24 hod
běh	20 000-28 000 g/m^2 za 24 hod.
extrémní fyzická aktivita	nad 35 000 g/m^2 za 24 hod.

3.1.1 Kapalná vlhkost

Lidský organismus v rámci své termoregulační činnosti produkuje vodu ve formě potu. Při teplotách kůže 34 °C uvolní lidské tělo do okolí přibližně 0,03 $\text{l}\cdot\text{h}^{-1}$ potu a při překročení této teploty se může uvolnit až 0,7 $\text{l}\cdot\text{h}^{-1}$. Ochlazení vzniká právě při odpaření potu, proto je poslední dobou velmi sledovaná hodnota paropropustnosti, která je u oblečení s membránou velmi důležitou hodnotou [2].

Odvod vlhkosti z povrchu lidského těla

Vlhkost, tedy lidský pot ve formě vodní páry, se může přenášet stejně jako teplo vedením či prouděním. Hnací silou je zde směr růstu mezi koncentrací nasycenou parciálním tlakem na povrchu lidské pokožky a aktuálním parciálním tlakem okolního prostředí.

Při dostatečném růstu výše zmíněných hnacích sil se odparem vlhkosti m z povrchu kůže odvede tepelný tok q podle vztahu:

$$q = m \cdot L \quad (1)$$

L je výparné teplo vody, které při 20 °C má hodnotu cca 2 400 000 J/kg. Takto vysoké výparné teplo umožňuje dosáhnout určité úrovně termofyziologického komfortu dokonce i při vysoké teplotě vzduchu, ale za předpokladu, že je vzduch dostatečně suchý, pokud je relativní vlhkost nižší než 70%. Je-li relativní vlhkost vzduchu vyšší jak 90%, pak žádný stav komfortu při teplotě vzduchu nad 35 °C není dosažitelný [2].

Jak již bylo zmíněno, vlhkost ve formě vodní páry se může přenášet stejně jako teplo vedením či prouděním.

3.1.2 Přenos tepla a vlhkosti

Sdílení (přenos) tepla je předávání tepla z místa o vyšší teplotě do místa o nižší teplotě (viz druhý termodynamický zákon o entropii). Přenos tepla se uskutečňuje třemi způsoby: sáláním, vedením a prouděním. Skutečné děje však představují téměř vždy kombinaci dvou nebo všech tří základních případů [3]. V této práci bude podrobněji probráno sdílení vedením a prouděním.

Kondukcce (přenos vedením)

Kondukcí (vedením) ztrácíme teplo (až 5 %) tehdy, je-li kůže v kontaktu s chladnějším prostředím. Jde o přenos tepla chodidly, zadní částí těla při sezení či spánku. Vedení tepla je také hlavním mechanismem přenosu tepla v tenkých vrstvách v oděvních systémech.

Vedení tepla lze rozdělit na:

- ustálené (stacionární) vedení tepla - teplotní rozdíl mezi jednotlivými částmi tělesa se v čase nemění.
- neustálené (nestacionární) vedení tepla - teplotní rozdíly mezi jednotlivými částmi tělesa, mezi kterými se teplo přenáší, se postupně vyrovnávají.

Ustálené vedení tepla lze demonstrovat např. na tyči délky d , jejíž jeden konec je udržován na teplotě t_1 a druhý konec je udržován na teplotě t_2 . Teplotní rozdíl $t_2 - t_1$ je tedy stálý, teplota klesá rovnoměrně od teplejšího konce k chladnějšímu.

Podíl se nazývá teplotní spád (gradient).

$$\frac{t_2 - t_1}{d} \quad (2)$$

Množství tepla Q , které za těchto podmínek projde libovolným kolmým průřezem S tyče za dobu τ , je roven:

$$Q = \lambda S \frac{t_2 - t_1}{d} \tau \quad (3)$$

Konstanta úměrnosti λ je součinitel tepelné vodivosti (tepelná vodivost).

Teplo procházející plochou určuje tzv. tepelný tok. Množství tepla Q , které projde plochou S za čas τ se označuje jako hustota tepelného toku.

$$q = \frac{Q}{\tau S} \quad (4)$$

Podle předchozích vztahů tedy při ustáleném stavu platí:

$$q = \lambda \frac{t_2 - t_1}{d} \quad (5)$$

Pokud tloušťku vrstvy (tedy délku tyče) d zmenšujeme na dx , změní se na této tenké vrstvě teplota o $-dt$. Vztah pro hustotu tepelného toku můžeme tedy přepsat:

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad (6)$$

Teplotní gradient $\frac{dt}{dx}$ se však může měnit nejen ve směru osy x , ale také v ostatních směrech. Jedná se tedy o vektorovou veličinu, což lze s pomocí operátoru gradientu vyjádřit jako:

$$\mathbf{q} = -\lambda \cdot \text{grad} t \quad (7)$$

Z tohoto vztahu je vidět, že průběh teploty v rovinné desce je při ustáleném proudění tepla lineární. Předchozí vztahy lze využít při řešení problému průchodu tepla rozhraním. Tento vztah bývá také označován jako *Fourierův zákon*.

Přenos vlhkosti kondukcí

Při dimenzování klimatizačních zařízení je často zapotřebí určit hmotnostní toky odpařující se vody a rovněž toky tepla z mokrých povrchů. Odpařování, které přitom nastává, zahrnuje přenos tepla i vlhkosti, přičemž oba procesy současně ovlivňují termodynamický stav vzduchu nad těmito povrchy.

Hustotu hmotnostního toku tekutin při jejich stacionární difuzi mezi místy s různou koncentrací, případně s různým parciálním tlakem, vyjadřuje Fickův zákon:

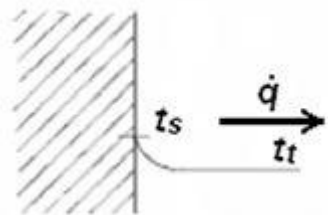
$$q = -D_c \frac{\partial p}{\partial n} [\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (8)$$

Fickův vztah platí pro oboustrannou difuzi, která však obvykle nastává. Zatímco vodní pára může difundovat z hladiny do vzduchu bez překážek, vzduch do vodní hladiny difundovat nemůže. Tento jev se fyzikálně vysvětluje takto:

Podle Fickova zákona difundují molekuly vodní páry z hladiny do vzduchu a současně i molekuly vzduchu směrem k hladině. Molekuly vzduchu se však dostanou pouze na povrch nepřestupní hladiny, kde se shlukují, nasycují vodní párou a konvekčním pohybem se vrací zpět [3].

Konvekce (přenos prouděním)

Konvekce je přenos tepla, ke kterému dochází v tekutinách (plynech, parách a kapalinách). Předpokladem vzniku konvekce je makroskopický pohyb částic tekutiny v kombinaci s teplotním gradientem, tzn. neizotermické proudění tekutiny. Je to fyzikálně složitý děj, který závisí na řadě parametrů. Mezi tyto parametry patří např. rychlost proudění, teplota stěny, teplota tekutiny, geometrie teplosměnné plochy, charakter rychlostní a teplotní mezní vrstvy, vlastnosti tekutiny a další. Newtonův zákon všechny tyto parametry shrnuje v součiniteli přestupu tepla α [3]. Na obr. 2 je uvedeno schéma Newtonova ochlazovacího zákona.



Obr. 2: Schéma Newtonova ochlazovacího zákona [5]

Newtonův ochlazovací zákon:

$$\dot{q} = \alpha \cdot |t_s - t_t| \quad (9)$$

\dot{q} hustota tepelného toku [W m^{-2}] t_s teplota stěny [$^{\circ}\text{C}$]

α součinitel přestupu tepla [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$] t_t teplota tekutiny [$^{\circ}\text{C}$]

Pro tepelný tok \dot{Q} [W] platí:

$$\dot{Q} = \dot{q} S = \alpha S (t_s - t_t) \quad (10)$$

Součinitel přestupu tepla α závisí na mnoha parametrech, určuje se experimentálně a za pomoci teorie podobnosti výsledky experimentů (kriteriální rovnice) můžeme aplikovat na jiné, geometricky podobné případy [3].

Podle způsobu obtékání tělesa tekutinou rozlišujeme dva druhy konvekce:

- Volná (přirozená) konvekce – tekutinu mechanicky nenutíme k pohybu, samovolně obtéká těleso (radiátory);
- Nucená konvekce – tekutinu nutíme k pohybu tlakovým spádem (kompresor, fén).

Dále rozlišujeme proudění laminární, při němž se částice tekutiny pohybují jen po vzájemných rovnoběžných proudnicích a proudění turbulentní, při němž se vrstvy promíchávají a částice proudu mají i složku rychlosti ve směru kolmém na osu kanálu.

Charakter proudění závisí na velikosti Reynoldsova čísla

$$\text{Re} = \frac{\text{setrvačné síly}}{\text{síly molekulárního tření proudu tekutiny}} = \frac{\rho w L}{\mu} = \frac{w L}{\nu} \quad (11)$$

kde w střední rychlost tekutiny v kanálu [m/s]

ν její kinematická viskozita [m^2/s]

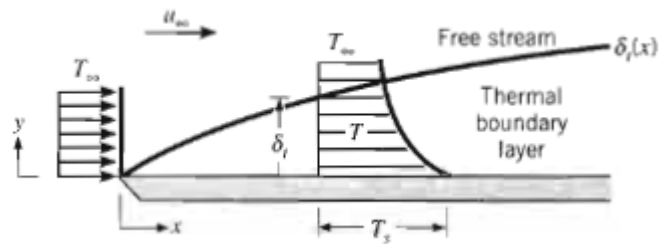
μ dynamická viskozita [Ns/m^2]

Do hodnoty $\text{Re} \cong 2300$ je proudění v kanálu laminární, při $2300 < \text{Re} < 10^4$ přechází ve vířivé a při $\text{Re} > 10^4$ je turbulentní [3].

Teplotní mezní vrstva

Při rozdílné teplotě tekutiny a stěny vzniká u jejího povrchu i teplotní mezní vrstva (TeMV, obr. 3), v níž se mění teplota tekutiny z hodnoty T_{∞} v jádru proudu na hodnotu T_s na

povrchu stěny. Tloušťka TeMV δ_t je definována jako hodnota y , pro které je poměr $[(T_s - T)/(T_s - T_\infty)] = 0,99$.



Obr. 3: Teplotní mezní vrstva na ploché desce

Poměr δ/δ_t vyjadřuje Prandtlovo číslo

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\eta c_p}{\lambda} \quad (12)$$

U tekutin s velkou kinematickou viskozitou ν a s malou teplotní vodivostí a (např. u olejů) $\delta > \delta_t \rightarrow Pr > 1$. U plynů $\delta \cong \delta_t \rightarrow Pr \cong 1$ (vzduch $Pr = 0,7$). U tekutých kovů $\delta < \delta_t \rightarrow Pr < 1$ [8].

V jakékoli vzdálenosti x od předního kraje může být povrchový tepelný tok získán aplikací Fourierova zákona na tekutiny v bodě $y = 0$

$$q_s'' = -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (13)$$

Kombinací rovnice (12) s Newtonovým ochlazovacím zákonem získáme:

$$\alpha = \frac{-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0}}{T_s - T_\infty} \quad (14)$$

Protože je rozdíl teplot $(T_s - T_\infty)$ konstantní, s rostoucím x roste δ_t a klesá teplotní gradient v mezní vrstvě. Z uvedeného vyplývá, že s rostoucím x klesá q_s'' a α .

Přenos tepla konvekcí

Hustota tepelného toku při přestupu tepla konvekcí se určuje z Newtonova vztahu:

$$\dot{q} = \alpha_k \cdot \Delta t \quad [\text{W m}^{-2}], \quad (15)$$

kde α_k je součinitel přestupu tepla konvekcí [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$], $\Delta t = |t_s - t_t|$ absolutní hodnota rozdílu teplot povrchu stěny a tekutiny [K].

Pro podmínky typické pro použití oděvu koeficient přestupu tepla může být spočítán následujícími přibližnými vztahy:

$$\text{pro volnou konvekci} \quad \alpha = 2,38(t_{sk} - t_a)^{0,25} \quad (16)$$

$$\text{pro nucenou konvekci s rychlostí 0-1 m/s} \quad \alpha = 3,5 + 5,2v \quad (17)$$

$$\text{při vyšších rychlostech proudění} \quad \alpha = 8,7v^{0,6} \quad (18)$$

Teplotní spád na tepelné mezní vrstvě při přestupu tepla prouděním je důsledkem tzv. vnějšího tepelného odporu $R_{\text{mezní vrstvy}} = R_E$, který musí být zahrnut do celkového tepelného odporu. R_E lze stanovit ze vztahu $R_E = \frac{1}{\alpha}$

$$\quad (19)$$

Veličina α_k je obecně funkcí většího počtu činitelů

$$\alpha_k = \alpha_k(v, \lambda, \rho, c, \eta, \chi, t_1, t_s, \Delta t, \phi, L_1, L_2, L_3, \dots) \quad (20)$$

kde v – rychlost proudu, η – dynamická viskozita tekutin,

λ – tepelná vodivost, χ – charakter proudění tekutiny,

ρ – hustota, ϕ – tvar přenosového povrchu,

c – měrná tepelná kapacita, L_1, L_2, L_3 – rozměry přenosového povrchu.

Veličina α_k se proto nedá vyjádřit jedinou funkcí, která by platila pro všechny případy konvektivního přenosu tepla. Pro jednotlivé oblasti přestupu tepla proto byly sestaveny zvláštní rovnice, nazvané kritériální.

Kritéria podobnosti tepelné konvekce

Jsou to bezrozměrné veličiny ve tvaru poměru fyzikálních, případně geometrických parametrů, charakterizujících určitý přenosový jev, které byly odvozeny zejména z diferenciálních rovnic mechaniky tekutin a přenosu tepla. Označují se počátečními písmeny badatelů, kteří se zasloužili o rozvoj mechaniky tekutin a přenosu tepla. Kritéria podobnosti jsou uvedena v tab. 3.

Kritéria podobnosti jsou dvojí: určující (obsahují nezávisle proměnné veličiny, např. fyzikální, geometrické) a určované (obsahují jednu závisle proměnnou, např. α_k).

Tab. 3: Kritéria podobnosti

Název kritéria	Tvar	Charakterizuje
Nusseltovo	$Nu = \frac{\alpha_k L}{\lambda}$	poměr tepelných odporů při přenosu tepla vedením a prouděním v mezní vrstvě tekutiny na povrchu tělesa
Reynoldsovo	$Re = \frac{\rho w L}{\eta} = \frac{wL}{\nu}$	poměr setrvačných sil a sil molekulárního působení
Prandtlovo	$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\eta c_p}{\lambda}$	podobnost fyzikálních vlastností v podobných soustavách. $Pr_{\text{vzduch}} = 0,7$
Grashofovo	$Gr = \frac{\beta g \Delta t L^3}{\nu^2}$	vztah mezi vztlakovými silami a silami molekulárního tření v tekutině

Kriteriální rovnice

Kriteriální rovnice vyjadřují matematickou závislost mezi hledaným, určovaným kritériem a určujícími kritérii. Mezi určovaná kritéria zjišťovaná při výpočtu tepelných zařízení patří Nusseltovo kritérium, obsahující součinitel přestupu tepla konvekcí α_k a Eulerovo kritérium, obsahující pokles tlaku účinkem ztrát Δp způsobený při proudění tekutin. Mezi určující kritéria zpravidla patří Re, Pr, Gr.

Kriteriální rovnice mají různý tvar pro případy konvekce beze změny skupenství, kdy rozlišujeme případy volné a nucené konvekce. Pro přirozenou konvekci v neomezeném prostoru platí $Nu = f(Gr, Pr)$, přesněji $Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n$, kde konstanty C a n závisí na součinu Gr.Pr dle tab. 4.

Tab. 4: Tabulka konstant pro vyjádření přirozené tepelné konvekce

Gr.Pr	C	n
$< 1 \cdot 10^{-3}$	0,450	0
$1 \cdot 10^{-3} \cong 5 \cdot 10^2$	1,180	0,125
$5 \cdot 10^2 \cong 2 \cdot 10^7$	0,540	0,250
$2 \cdot 10^7 \cong 1 \cdot 10^{13}$	0,195	0,333

Pro nucené proudění nacházíme kritériální rovnice nejčastěji ve tvaru $Nu = f(Re, Pr)$, přesněji [3]:

$$\text{laminární proudění} \quad Nu = 0,664 Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad (21)$$

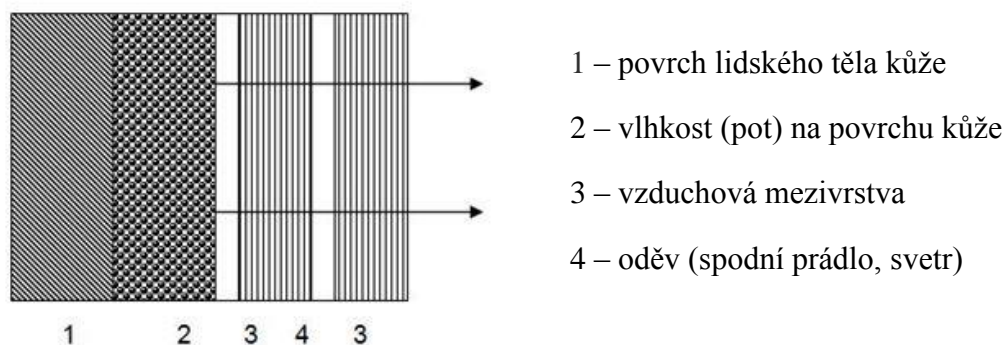
$$\text{turbulentní proudění, } Pr \approx 1 \quad Nu = 0,023 Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33} \quad (22)$$

$$\text{turbulentní proudění, } Pr > 1 \quad Nu = 0,015 Re^{0,83} \cdot Pr^{0,42} \quad (23)$$

$$\text{turbulentní proudění, } Pr < 1 \quad Nu = 4,8 + 0,0156 Re^{0,85} \cdot Pr^{0,93} \quad (24)$$

3.1.3 Difúze

Difúze je prostup vlhkosti (potu) z povrchu pokožky do okolního prostředí skrz oděvní systém (pórů). Je to tedy proces rozptylování vlhkosti v prostoru. Na obr. 4 je vidět prostup vlhkosti, která je na povrchu kůže, skrz oděvní systém včetně vzduchové mezivrstvy do okolního prostředí s nižší koncentrací vlhkosti.



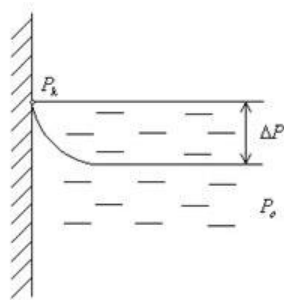
Obr. 4: Prostup vlhkosti do okolního prostředí

Platí, že čím je delší a užší pór ve struktuře (tkaniny či pleteniny), tím dochází ke zvýšení difúzního odporu.

Vlhkost má tendenci přecházet z prostředí s vyšší koncentrací do prostředí s nižší koncentrací. Tento princip probíhá bez nutnosti dodávky některé formy energie. Přírozenou vlastností látek je, že pokud se její částice mohou pohybovat, tak se rozptylují do celého prostoru, kterého mohou dosáhnout, a postupně ve všech jeho částech vyrovnají svou koncentraci. Říkáme, že látky difundují.

U volného povrchu kůže je jedinou podmínkou odparu dostatečný rozdíl parciálních tlaků páry obr. 5 [2].

$$\Delta P = P_k - P_o \quad (25)$$



Obr. 5: Odvod vlhkosti z volného povrchu kůže odparem [2]

Každá část oděvu vytváří difúzní odpor a jednotlivé části oděvu se sčítají, též se musí počítat i s odporem vzduchové mezivrstvy mezi jednotlivými částmi oděvu.

Vlhkost prostupuje textilií od nižšího parciálního tlaku vodní páry. Difúzní odpor je ovlivňován jednotlivými oděvními vrstvami různých druhů i kvalit, jako například: nátělník, košile, sako a kabát. Tyto jednotlivé oděvní vrstvy se sčítají, přičemž značnou roli hraje i odpor vzduchových mezivrstev.

Vteřinové množství páry m^* [$kg \cdot m^{-2} \cdot s$] přenášené difúzí vrstvou klidného vzduchu je úměrné difúznímu koeficientu D_p [$kg / m \cdot s \cdot Pa$] a gradientu parciálního tlaku $\Delta p_{parc} / \Delta x$ podle Fricova zákona.

$$m^* = -D_p \cdot \Delta p_{parc} / \Delta x = -D_p \cdot (p_{wsat} - p_{we}) / h = (p_{wsat} - p_{we}) / R \quad (26)$$

kde

$$R_{wp} = h / D_p \quad \text{nebo} \quad R_{wc} = h / D_c \quad (27,28)$$

V porézním prostředí, jakým jsou textilie, je pára přenášena difúzí přes otvory, resp. kanály, které jsou v jednotlivých součástech oděvu. Pokud chybí vliv volné konvekce nebo tzv. pumpovaný efekt vyvozený ventilací, je odpor proti průchodu vodní páry porézním prostředím s průchozími póry dán vztahem:

$$R_{wp} = \xi \cdot h / \varepsilon \cdot D_p \quad (29)$$

Zvýšení odporu proti přenosu vlhkosti porézními textilními materiály oproti hladině, která je nad volnou mezerou, způsobuje snížení koeficientu porosity $\varepsilon < 1$ a zvětšující se délkou kanálů, která je charakterizována faktorem tortuosity $\xi > 1$. To může mít za následek relativně vysoký odpor proti vodním parám R_{WF} . Díky větší porozitě mají otevřené materiály, jako např. pleteniny, daleko větší propustnost vodní páry, neboli menší odpor proti přenosu vodní páry než tkaniny [2].

3.1.4 Stanovení relativní propustnosti pro vodní páry

Permetest měří relativní propustnost textilií pro vodní páry p v [%], což je parametr nenormalizovaný, ale velmi praktický, kde 100% propustnosti představuje tok q_o vyvozeným odparem z volné vodní hladiny o stejném průměru, jaký má měřený vzorek. Zakrytím této hladiny měřeným vzorkem se pak teplený tok sníží na hodnotu q_v , platí [2]:

$$p = 100(q_v / q_o) \text{ [%]} \quad (30)$$

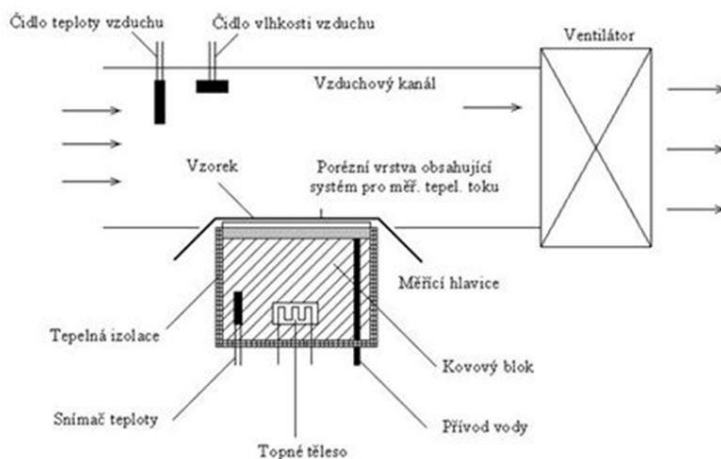
Stanovení výparného odporu:

$$R_{et} = (P_m - P_a)(q_v^{-1} - q_o^{-1}) \text{ [Pa.m}^2\text{/W]}. \quad (31)$$

Přístroj Permetest

Přístroj je založený na přímém měření tepelného toku q procházejícího povrchem tohoto tepelného modelu lidské pokožky. Povrch modelu je porézní a je zavlhčován, čímž se simuluje funkce ochlazování pocením. Na tento povrch je přiložen přes separační folii měřený vzorek. Vnější strana vzorku je ofukována. Přístroj permetest můžeme vidět na obr. 6.

Při měření výparného odporu a paropropustnosti je měřící hlavice pomocí elektrické topné spirály a regulátoru udržována na teplotě okolního vzduchu (20-23°C), který je do přístroje nasáván. Tím jsou zajištěny izotermické podmínky měření. Během měření se vlhkost v porézní vrstvě mění v páru, která prochází skrz separační fólii vzorkem. Výparný tepelný tok je následně změřen snímačem a jeho hodnota je úměrná paropropustnosti textilie, nebo nepřímo úměrná jejímu výparnému odporu. V obou případech se však nejdříve měří tepelný tok bez vzorku a následně se vzorkem. Přístroj zaregistruje oba odpovídající tepelné toky q_o a q_v . Výhodou tohoto přístroje je relativně krátká doba měření a možnost provádět měření v jakýchkoliv běžných klimatických podmínkách [2].



Obr. 6: Permetest [2]

3.2 Propustnost textilií pro vzduch

Při vysokém fyzickém zatížení vzniká teplo, které je potřeba odvést z oděvního systému. To je možné, pokud je vnější vzduch chladnější a oděv je dostatečně prodyšný.

U sportovních oděvů (např. dresů) je vysoká prodyšnost žádoucí, naopak u zimního oblečení a oblečení pro vysokohorskou turistiku je prodyšnost nežádoucí, protože je vystaveno chladnému vzduchu.

3.2.1 Prodyšnost

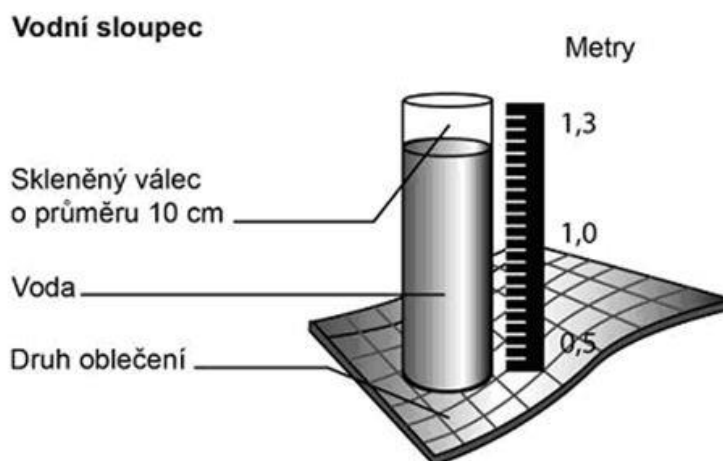
V předchozí kapitole byla zmínka o prodyšnosti, kde bylo uvedeno, že prodyšnost je prostup vzduchu skrz oděvní systém, tedy spodní prádlo, triko, svetr či bundu z vnějšího prostředí k nositeli. Při vysokém fyzickém zatížení vzniká teplo, které je potřeba odvést z oděvního systému. To je možné, pokud je vnější vzduch chladnější a oděv je dostatečně prodyšný. U sportovních oděvů (např. dresů) je vysoká prodyšnost žádoucí, naopak u zimního oblečení a oblečení pro vysokohorskou turistiku je prodyšnost nežádoucí, protože je vystaveno chladnému vzduchu.

3.3 Hydrostatická odolnost textilií

Hydrostatická odolnost outdoorových oděvů se stala v posledních letech velmi důležitým parametrem pro kvalitu výrobku. Proto je tomuto parametru věnována značná pozornost při hodnocení oděvu.

Hydrostatická odolnost je na výrobcích uváděna jako výška vodního sloupce. Vodní sloupec je pomocný údaj, který vyjadřuje schopnost materiálu odolávat hydrostatickému tlaku. Čím je udávaná hodnota vyšší, tím je materiál odolnější vůči promoknutí. V laboratořích se vodní sloupec měří na speciálních přístrojích a hodnota tlaku se poté pro lepší orientaci převádí na výšku vodního sloupce v milimetrech či metrech. Velmi zjednodušeně lze měřit hydrostatickou odolnost tak, že se na materiál přiloží skleněný válec o průměru 10 cm, který se naplní vodou, obr. 7. Voda ve válci působí na materiál a po průniku prvních tří kapek je určena hodnota hydrostatické odolnosti. Měření se používá pro výrobky, které by neměly propustit vodu, například stany, oblečení, batohy a další.

Za nepromokavé lze označit oblečení z materiálů s hodnotou výšky vodního sloupce od 1 300 mm. Taková kvalita postačí k zadržení dopadajících dešťových kapek. Volně padající déšť působí ekvivalentem zhruba 1 300 mm výšky vodního sloupce. Pod popruhy batohu však voda proniká do oblečení tak, jakoby působil tlak až 20 000 mm výšky vodního sloupce (záleží samozřejmě na váze batohu), tomuto tlaku způsobeného batohem říkáme tzv. klínový efekt. Také při pádu do mokrého sněhu může hodnota tlaku dosahovat až 20 000 mm hranici. Z toho plyne nutnost definovat nepromokavost oblečení s ohledem na konkrétní kategorie užívání [47].



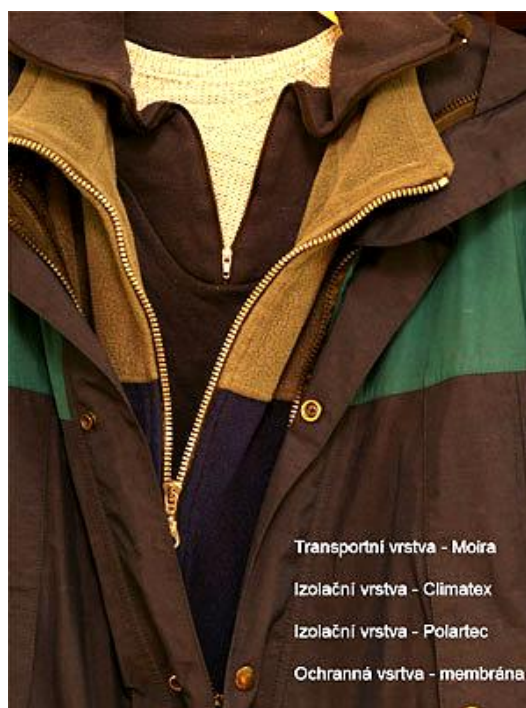
Obr. 7: Zjednodušené měření hydrostatické odolnosti

3.4 Vrstvené oblékání

V dnešní době existuje nepřeberné množství různých typů outdoorových výrobků od spodního prádla počínaje, až po membránové oblečení různých kvalit konče. Někteří zákazníci v poslední době sice věnují pozornost funkčnímu prádлу a membránovému oblečení, ale jen malé procento z nich věnuje pozornost i dalším vrstvám a vzájemnému

funkčnímu propojení jako celku. Jinými slovy řečeno, je velmi pěkné, že si zákazník koupí kvalitní funkční prádlo a membránové oblečení, ale pokud mezi to vloží (oblékne) nefunkční vrstvu, celý systém se tak výrazně zhorší a nedojde tak k požadovanému efektu. Navíc mnoho zákazníků ani nemá představu, jak vrstvit jednotlivé části oděvu. Tato kapitola by měla popsat základní zákonitosti vrstveného oblékání.

Je důležité obléci se tak, abychom se cítili v teple a zároveň v suchu. Toho dosáhneme, pokud bude pot kvalitně odváděn směrem ven od těla, když všechny vrstvy oblečení budou velmi dobře paropropustné. V opačném případě nás bude oblečení za chvíli nepříjemně studit na těle a můžeme tak snadno nastydnout. Z tohoto důvodu je důležité dodržovat zásady vrstveného oblékání, především mít dostatečnou tepelně izolační vrstvu. Na obr. 8 je znázorněn obrázek s popisem, jak je možné se správně vrstveně obléknout [4].



Obr. 8: Vrstvené oblékání [4]

Vrstvený systém oblékání poskytuje efektivní způsob, jak v náročných klimatických podmínkách udržet tělo v optimální tepelné pohodě bez příznaků podchlazení nebo přehřátí. Celý systém vrstveného oblečení je založen na vhodné kombinaci materiálů rozdílných vlastností. Není proto možné měnit pořadí jednotlivých vrstev, jelikož by v tomto případě došlo ke zrušení celého efektu.

Systém vrstveného oblékání je založen především na udržování tzv. mikroklima těla. Pokud dojde k velké ztrátě tepla nebo přehřátí, v těle jsou spuštěny procesy k obnově

rovnováhy a optimálního tělesného mikroklimatu. Celý tento děj vyžaduje od lidského organismu vysokou spotřebu energie. Systém oblečení by proto měl být z tohoto důvodu optimálně využíván, a to především vzhledem ke změnám počasí a stupni naší pohybové aktivity.

Moderní systém vrstveného oblékání se skládá ze tří základních vrstev (sací, izolační a svrchní), z nichž každá funguje jako specifický ochranný prvek proti vlivům počasí. V některých případech se užívají ještě další tzv. super izolační vrstvy. V tab. 5 je uveden stručný přehled základních vrstev oblečení [4].

Tab. 5: Přehled základních vrstev oblečení

Název vrstvy	Funkce vrstvy	Realizace
Transportní vrstva	udržovat suché a pohodlné mikroklima u pokožky	odvodem vlhkosti směrem od těla skrz povrch materiálu
Izolační vrstva	poskytnout dostatečný tepelný komfort, v případě, že sací a svrchní vrstva dostatečně neizoluje	omezení či zamezení konvekce
Ochranná vrstva	poskytnout ochranu proti větru, dešti, sněhu, aniž by docházelo ke kondenzaci par (pocení) uvnitř oblečení	zábrana proti vodě a větru, přičemž umožňuje průchod vodních par směrem ven

3.4.1 Transportní vrstva

Transportní vrstva je nejspodnější vrstva oblečení doléhající těsně na tělo. Jejím úkolem je odvádět tělesnou vlhkost (pot) z pokožky a zabránovat tím ochlazování nebo přehřívání v důsledku fyzické aktivity. Tím se udržuje tělo v tepelném komfortu. Tato vrstva se vyrábí z materiálů a vláken, které pot nezachycují (neabsorbují), ale odvádí (transportují). Tato vrstva se označuje jako termoprádlo, obr. 9. Termoprádlo se nosí i v teplém počasí [4].



Obr. 9: Ukázka struktury termoprádla - vlevo letní, vpravo zimní [4]

Funkční prádlo

Každý člověk se bude cítit opravdu lépe, když bude tělem vyprodukovaný pot odváděn pryč. Tenčí jednovrstvé prádlo vhodné do letního počasí, případně na sport, se označuje jako micro. Teplejší dvouvrstvá pletenina se označuje jako thermo. Je vhodná do chladnějšího počasí. Termoprádlo nesmí škrtit, ani nesmí být příliš volné. Má volně přiléhat na tělo, protože jen v kontaktu s kůží optimálně plní svou funkci. Pokud tričko na těle vlaje, musí se pot nejprve z těla odpařit a teprve následně páry potu na prádle zkondenzovat, aby mohly být odvedeny od těla [4].

3.4.2 Izolační vrstva

Hlavní funkcí této vrstvy je udržení tělesné teploty zachycením (akumulací) tělesného tepla. Současně ale musí i tato vrstva splňovat podmínku paropropustnosti, tedy odvádění vyprodukovaného potu a přebytečného tepla ven. V opačném případě by se vyprodukované teplo nahromadilo v oděvním systému v podobě potu a ten by tělo ochlazoval. Tato vrstva se vyrábí z různých druhů izolačních syntetických vláken, která odvádí tělesnou vlhkost (pot) a zachovávají si dobré izolační vlastnosti. Nejčastěji se používají fleecové materiály rozličných gramáží a povrchových úprav. I když se stále bude jednat o jednu izolační vrstvu (z hlediska této teorie), může být zejména v chladnějším období složena z více kusů oblečení, např. lehčí fleecový rolák a teplá fleecová mikina.

Izolační vrstva může být vyrobena z rozmanitých druhů izolačních vláken, případně tkanin, které nehromadí vlhkost a zachovávají si dobré izolační vlastnosti. V letním a jarním období se často používá jako svrchní vrstva. Důležitou roli tak hraje také její větruodolnost [4].

3.4.3 Ochranná vrstva

Poslední (svrchní) vrstva má za úkol chránit tělo před okolním počasím a současně musí zachovávat vlastnosti spodních vrstev. To znamená, že musí být nepromokavá, aby zabránila promočení transportní a izolační vrstvy a zároveň musí být i paropropustná, aby zabránila hromadění tělesné vlhkosti zevnitř v izolační vrstvě. Navíc musí být tato vrstva odolná i vůči větru, aby zabránila úbytku tělesného tepla v důsledku proudění vzduchu. V zabezpečení celkové úlohy funkčního oblečení hraje tato vrstva podstatnou roli. V souvislosti s touto vrstvou je spojován pojem membrána, může se jednat např. o Gore-tex, Gelanots, Sympatex atd [4].

3.4.4 Kombinovaná vrstva

V poslední době získala popularitu kombinovaná vrstva, která spojuje vlastnosti izolační a ochranné vrstvy. Bývá odolná vůči větru, nepromokavá (nebo částečně nepromokavá) a dobře prodyšná. Zejména v méně náročnějších klimatických podmínkách je tak možné snížit počet vrstev na dvě. Setkat se můžeme s materiály např. Windstopper, No-wind, Polartec Power Stretch, SoftShell atd [4].

3.5 Počty vrstev dle klimatických podmínek

Horké letní počasí

Za horkého letního počasí stačí pouze jedna vrstva funkčního oblečení, která by měla mít maximální hodnoty pro odvod vlhkosti, ale minimální pro tepelnou izolaci. Takové oblečení odvede od těla pot na vnější stranu, kde se díky teplu pot rychle odpaří. Kůže i prádlo tak zůstávají suché a tělo je díky proudění vzduchu příjemně ochlazováno [2].

Chladno (jaro, podzim)

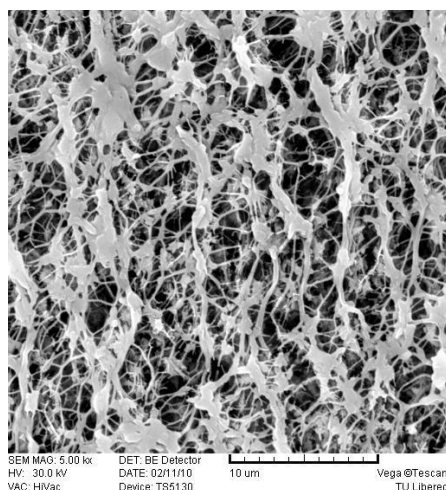
Do chladného počasí se volí dvě až tři vrstvy. První vrstvu opět s maximálním odvodem vlhkosti (paropropustnosti). Druhá vrstva je důležitá z hlediska tepelné pohody a pohybovala by se od lehké fleecové mikiny (bezvětrí a příznivějšího stupně Celsia) po teplou fleecovou mikinu (vítr, chladno). Třetí vrstva by byla nutná za větru, deště či nízké teploty, (pokud by nebyla splněna uvedená kritéria, měla by tato vrstva být v záloze v batohu), vhodná je k použití větrovka se zátěrem (vítr, ale bez deště) nebo membránová bunda (vítr, déšť či chladno). Případně bychom mohli druhou a třetí vrstvu zkombinovat do jedné, např. mikina (či bunda) s membránou [2].

Zima

Na zimu budeme potřebovat tři až čtyři vrstvy. Spodní vrstva s co nejlepší kombinací odvodu vlhkosti a tepelné izolace – jedna až dvě tepelně izolační vrstvy (teplá fleecová mikina či bunda, případně ještě jedna lehčí mikina nebo rolák). Na vrchní vrstvu se v zimě vždy používá membránová bunda [2].

4 Přehled průmyslově vyráběných membrán

Koncem padesátých let Bill Gore, spoluzakladatel firmy Gore, navrhuje v době svého působení ve společnosti DuPont použití polytetrafluoroethylenu (PTFE) pro izolaci drátů. A v roce 1969 Bob Gore, jeho syn, vyvinul membránu GORE-TEX®. Jedná se o mikroporézní membránu, která se vyrábí z polytetrafluoretylenu (PTFE) tažením za kritických podmínek v podélném a příčném směru z neprodyšných membrán, což má za následek vznik četných mikrotrhlin nebo mikropórozitu, obr. 10. Výrobce uvádí, že tyto póry mají být 20 000krát menší než kapka vody a zároveň 700krát větší než molekuly vodní páry. Tím vznikne membrána nepromokavá a větruvzdorná, ale zároveň odvádějící vodní páru. Podle vlastních měření laminátů s mikroporézní membránou Gore-tex má dle výrobních řad paropropustnost Ret od 1,9 až 8 Pa .m² .W⁻¹ a hydrostatickou odolnost od 7 000 mm do 29 000 mm [5].



Obr. 10: Membrána z PTFE od firmy Gore-tex

Dalším známým výrobcem je firma eVent se svoji membránou Direct Venting™ Technology. Firmu eVent založili bývalí zaměstnanci společnosti Gore-tex. Membrána eVent je velmi podobná membráně Gore-tex včetně udávaných hodnot paropropustnosti, prodyšnosti a hydrostatické odolnosti [6].

Firma Porelle nabízí jak mikroporézní membrány z PTFE určené především pro pracovní oděvy, tak i hydrofilní membrány z polyuretanu [7].

Na trhu se však daleko častěji setkáváme s výrobcí hydrofilních membrán, důvodem je především výrobní cena a snadnější výroba. Firma Sympatex je výrobcem hydrofilní membrány. Membrána je vyrobena ze 100% recyklovaného materiálu - polyesteru. Neporézní hydrofilní fólie je vyrobena z kopolymeru sestávajícího ze 70 % z polyesteru (hydrofobní část) a ze 30 % z hydrofilního polyethylenu. Fólie má tloušťku v jednotkách mikrometrů.

Nepromokavost je definována dle výrobce s 25 m vodního sloupce, propustnost samotné membrány je $\text{Ret } 1,5 \text{ Pa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ a je 100 % větruodolná [8].

Další neporézní hydrofilní membránou je Dermizax od japonského výrobce Toray. Tyto membrány jsou vyrobené z PU. Výrobce garantované parametry pro Dermizax EV 2L je 20 000 mm vodního sloupce a paropropustnost je $20\,000 \text{ g/m}^2/24 \text{ hod}$ [9].

Stejně jako společnost Toray, tak BlokVent a Gelanots od Japonské textilní firmy Tomen Corporation vyrábí hydrofilní membrány na bázi polyuretanu, přičemž dle údajů výrobců není hydrostatická odolnost vyšší jak 25 000 mm a paropropustnost je maximálně $20\,000 \text{ g/m}^2/24 \text{ hod}$ [10, 11].

4.1 Přehled současného stavu nanovlákných membrán

Česká firma Alpine Pro využívá pro část své kolekce membránu PTX Nomax vyrobenou z PTFE. Dle výrobce je paropropustnost membrány $\text{Ret } 3,5 \text{ Pa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$. Stejně tak korejská firma Finetex prezentovala na výstavě Nanotech 2012 v Tokiu nanovláknennou membránu vyrobenou z PUR s paropropustností od $4,5 \text{ Pa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ a s hydrostatickou odolností 10 000 mm, avšak průměr vláken je vyšší jak 600 nm [12].

Americká firma Polartec vyvinula membránu s PU. Dle vlastních měření bylo zjištěno, že průměr vláken je okolo 600 nm, paropropustnost samotné membrány je okolo $0,5 \text{ Pa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ a hydrostatická odolnost byla 7 500 mm [13].

Firma DuPont nabízí nanovláknennou hydrofobní membránu pod označením Hybridní Membrane Technology. Průměr vláken se pohybuje v rozmezí od 200 do 800 nm. Membrána je vyrobena z polyamidu 6.6 s plošnou hmotností od $10 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ v šíři až 1,7 m [14].

Firma Donalds Company je dalším výrobcem membrán, avšak se zaměřením na filtrační činnost. Průměr vláken je dle výrobce do 500 nm. Kromě nanovlákných vrstev nabízí membrány pro filtraci na bázi PTFE [15].

Tým vědců pod vedením profesora Hyung Gyu na katedře strojního a procesního inženýrství na ETH v Curychu vytvořil porézní membránu s tloušťkou pod 1 μm . Membrána je vytvořena ze dvou vrstev grafenu a do této vrstvy jsou leptané malé póry o přesně definované velikosti. Musí být použity dvě vrstvy grafenu, jelikož dle výzkumů je grafen nerovnoměrný [16].

Kay Obendorf porovnával nanovláknenné membrány z PU s plošnou hmotností 1 a 2 g/m^2 s mikroporézní membránou. Ve své práci nenalezl rozdíl v paropropustnosti mezi

nanovláknennou a mikroporézní membránou, avšak byla zaznamenána vyšší prodyšnost z nanovláknenné membrány [17]. Dalším porovnáním nanovláknenné membrány s mikroporézní se zabýval Hae Wook Ahn. Hydrostatická odolnost nanovláknenné membrány z PU dosáhla přes 3 000 mm a mikroporézní membrána dosáhla hodnoty vyšší jak 12 000 mm. Paropropustnost nanovláknenné membrány byla $3,6 \text{ Pa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ a mikroporézní $6,8 \text{ Pa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ [18].

Mufang Li se ve své práci zabývá výrobou poly(trimethylene terephthalate) nanovláknenné membrány pro mikrofiltraci. V tomto případě by ale byl ke zdárnému použití v praxi naléhavě zapotřebí rozvoj vysoké propustnosti, zároveň nízkých výrobních nákladů a techniky pro výrobu termoplastických nanovláknenných membrán s využitím vysokootáčkového mixéru. V této studii nanovláknena byla připravena tzv. termoplastickou metodou výroby nanovláken. Tato metoda spočívá v tavení, míchání a vytlačování dvou nemísitelných termoplastických polymerů. Takto připravená nanovláknena lze použít pro výrobu membrán. Průměr vláken je okolo 145 nm. Takto připravená membrána je určena především pro filtraci [19].

Philip Gibsom vyrobil nanovláknennou membránu též z PA 6.6 pomocí elektrospinningu, tzv. jet systém. Průměr vláken se pohybuje v rozmezí od 200 do 500 nm a nanovláknena byla zvlákněna přímo na PU pěnu s přidavkem částic uhlíku za účelem tvorby pro chemickobiologickou ochranu člověka. Výsledkem je membrána s vysokou paropropustností a s filtrační schopností. Stejně tak práce Ramalingama Balamurugana se zabývá vývojem nanovláknenné membrány vyrobené elektrospingem a aplikaci nanočástic, což umožnilo vytvoření chemickobiologické membrány na ochranu člověka [20].

V práci Boorama Yoona je popis výroby nanovláknenné membrány pro sportovní oděvy. Jako výchozí polymer pro nanovláknennou membránu byl použit PU s rozpouštědlem DMF, koncentrace roztoku byla 13%. Nanovláknenná vrstva byla vyrobena pomocí elektrospinningu z trysek. Na laboratorním zvláknovacím zařízení byla plošná vrstva nanovláken $10,2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ a na výrobním průmyslovém zařízení od firmy Fine-tex byla plošná hmotnost $5,2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. Byly vytvořeny dvouvrstvé lamináty, kde paropropustnost byla maximálně $5\,500 \text{ g}/\text{m}^2/24\text{hod}$. Prodyšnost byla $0,6 \text{ cm}^3/\text{cm}^2/\text{s}$ a hydrostatická odolnost nebyla vyšší jak 8 000 mm [21].

V další práci od Roohollaha Bagherzadeha je popis výroby nanovláknenné membrány, kde jako výchozí polymer byl použit PAN. Roztok byl připraven již ze zmiňovaného PAN s DMF, koncentrace roztoku byla od 10 do 18 %. Membrána byla vyrobena elektrostaticky s průměrem vláken v rozmezí od 100 do 350 nm. Plošná hmotnost nanovláknenné membrány

byla od 1,2 do 1,5 g.m⁻². Paropropustnost nanovláknenné membrány byla do 10 000 g/m²/24hod [22].

Další nanovláknennou membránu vyrobenou z PU pomocí elektrostatického zvlákňování představil Gorji ve své práci. PU byl smíchán s DMF a vytvořil se 13% roztok. Podmínky zvlákňování: vzdálenost jehly od kolektoru 13 cm, napětí 13 kV a rychlost návínu 400 mm/min. Tato membrána má plošnou hmotnost 17,8 g.m⁻² a tloušťka membrány je 21,9 μm. Nanovláknenná membrána dosáhla v paropropustnosti hodnoty 39,2 g/m²/24hod prodyšnosti 180 cfm a hydrostatické odolnosti 12,9 cm [23]. Stejně tak Sunsin Lee vytvořil nanovláknennou membránu z PU pomocí elektrostatického zvlákňování pomocí jehly. Průměr nanovláken byl 300 nm. Jako substrát pro záchyt nanovláken během zvlákňování byla POP netkaná textilie a následně došlo pravděpodobně (nebylo více specifikováno) k přiložení ke tkanině. Vzorky byly vyhotoveny ve dvou plošných hmotnostech 1 a 2 g.m⁻². U vzorku s plošnou hmotností 1 g.m⁻² byla paropropustnost 19,90 g/m²/24hod. a prodyšnost byla 158,75 cm³/s/cm². U vzorku s plošnou hmotností 2 g.m⁻² byla paropropustnost 19,35 g/m²/24hod. a prodyšnost byla 116,56 cm³/s/cm². Autor hydrostatickou odolnost neuvádí [24].

Stejný autor popisuje vliv praní na nanovláknennou membránu z PU. Testovány byly tři vzorky s průměrem vláken od 660 nm do 700 nm, všechny vzorky byly vyrobeny průmyslově pomocí elektrosponingu. Membrány byly slaminovány pomocí hot-metů s tkaninou ze 100 % PA. Paropropustnost byla od 8 000 do 10 000 g/m²/24hod a nedošlo ke zhoršení ani po pracích cyklech. Výsledek ukázal, že po 10 deseti pracích cyklech nedošlo k výraznému zhoršení adheze mezi nanovláknennou membránou a tkaninou [25]. Yun Kang Kang popisuje výrobu nanovláknenné membrány z PU s využitím DMF jako rozpouštědla. Nanovláknenná membrána sice dosahuje vyšších paropropustnosti a prodyšnosti oproti běžným komerčním membránám, avšak vykazuje velmi malou hydrostatickou odolnost [26].

Některé nanovláknenné membrány byly patentovány, a proto byla provedena i patentová rešerše. Příkladem je americký patent US 20080220676 A1. Podstata vynálezu je založena na aplikaci fluorkarbonu za využití pojiva, kterým byla pryskyřice. Fluorkarbon je nanosen přímo na nanovláknennou vrstvu, která je vyrobena elektrostaticky. Pro výrobu nanovláknenné membrány mohou být použity různé polymery např. PES, PA6, PA6.6 atd. Průměr nanovláken je v rozmezí od 50 do 1 000 nm s plošnou hmotností od 1 do 100 g/m². Výsledkem je úhel smáčení vyšší jak 145⁰ a s hydrostatickou odolností převyšující 50cm. Paropropustnost je okolo 500 g/m²/24hod a prodyšnost okolo 0,5 m³/min/m² [27]. V dalším americkém patentu US 20110092122 A1 je další popis výroby nanovláknenné membrány.

Podstata vynálezu oproti předchozímu se liší pouze v tom, že na povrch nanovlákněné membrány není aplikována žádná látka. Výsledkem je paropropustnost $500 \text{ g/m}^2/24\text{hod}$ a prodyšnost okolo $7,6 \text{ m}^3/\text{min/m}^2$. Hydrostatická odolnost není v patentu uvedena [28].

4.1.1 Analýza současného stavu problematiky nanovlákněných membrán

Z provedené rešerše je patrné, že existuje relativně hodně výrobců membrán určených pro sportovní, outdoorové a armádní účely.

Současní výrobci využívají dva typy membrán:

- hydrofobní (mikroporézní)
- hydrofilní (neporézní)

Hlavním kritériem výrobců nanovlákněných membrán je komfort zaměřený na prodyšnost, paropropustnost a hydrostatickou odolnost, případně další vlastnosti, které ale řeší celek, tedy laminát s membránou. Je patrné, že hydrofobní mikroporézní membrány nejen dle výrobců, ale i vlastních měření, jsou z hlediska komfortu lepší než hydrofobní neporézní. Především se jedná o paropropustnost. Také si můžeme všimnout, že výrobci mikroporézních membrán daleko častěji uvádí hodnoty paropropustnosti v Ret a nikoliv MVTR jako větší výrobci hydrofilních membrán. Ovšem tento jev je patrný i z vědeckých prací zabývajících se nanovlákněnými membránami. Hlavní příčina bude pravděpodobně v tom, že hodnoty Ret jsou daleko přesnější než hodnoty MVTR a tudíž výrobci raději používají méně objektivní, avšak pro ně příjemnější výsledky paropropustnosti v MVTR. Naopak v prodyšnosti jsou hydrofilní membrány lepší, avšak rozdíl je zanedbatelný narozdíl od paropropustnosti. Hydrostatická odolnost může být stejná jak mezi výrobci hydrofilních, tak mikroporézních membrán.

V druhé polovině byla rešerše věnována jak výrobcům, tak především výsledkům z výzkumu nanovlákněných membrán pro sportovní, outdoorové a armádní účely. Výrobců nanovlákněných membrán je jen zlomek oproti výrobcům mikroporézních či hydrofilních membrán. Výsledky ovšem nejsou příliš odlišné především od mikroporézních membrán či dokonce dosahují i v některých případech horších výsledků. Stejně tomu tak je ve vědeckých pracích, kde výsledky nejsou příliš oslnivé. Ve velké části vědeckých prací není uvedena hydrostatická odolnost, nebo-li výška vodního sloupce, která je neoddelitelnou součástí membrány, ale především i komfortu textilií. Stejně tomu tak je i v oblasti laminace, kde buď není uvedena vůbec, nebo jen sporadicky. Ovšem jak již bylo uvedeno, membrána nemůže

existovat samotná v oděvu, výjimkou jsou rukavice s membránou, kde je laminát typu Z-liner, ale na to je nanovlákněná vrstva příliš jemná pro tento typ laminátu.

Z výsledků různých vědeckých prací vyplývá, že dosud nebylo možné vyhotovit oděv s nanovlákněnou membránou, buď nemá dostatečnou hydrostatickou odolnost, nebo není nanovlákněná membrána slaminována s vhodným materiálem, kterým je především tkanina či pletenina.

Z patentové rešerše je patrné, že jeden z uvedených patentů se vůbec nezabývá laminací, ani hydrostatickou odolností. Druhý z uvedených patentů sice uvádí, že laminace je možná z běžně známých možností, avšak blíže tyto možnosti nespecifikuje a ani se nezabývá její realizací. Ovšem zabývá se zvyšováním hydrostatické odolnosti nanovlákněné membrány pomocí působení hydrofobního prostředku, a to přesněji fluorkarbonu, je ale uveden pouze úhel smáčení, což není vůbec kritérium proto, aby byla hydrostatická odolnost nanovlákněné membrány dostatečná.

Je zřejmé, jak již bylo uvedeno, že je nutné a důležité se více zabývat vývojem nanovlákněných membrán pro sportovní, outdoorové a případně i armádní účely. Předem je nutné se zaměřit na zvyšování hydrostatické odolnosti nanovlákněné vrstvy a následně laminaci nanovlákněné membrány s vhodným textilním materiálem, jako je tkanina či pletenina.

5 Přehled kroků k vývoji nanovláknenné membrány

Z předchozích kapitol je zřejmé, že je nutné k úspěšnému vyvinutí laminátu s nanovláknennou membránou s dostatečnými komfortními vlastnostmi udělat několik důležitých kroků, které jsou chronologicky a logicky znázorněny na obr. 11.



Obr. 11: Schéma postupu výroby laminátu s nanovláknennou vrstvou

Celá práce je rozdělena na tři hlavní části od výroby nanovláknenné vrstvy až po tvorbu laminátu. Jednotlivé části jsou doplněny teorií a rešerší dané oblasti.

5.1 Výroba nanovláknenné vrstvy

Nanovláknenná vrstva byla připravena na laboratorním a posléze na průmyslovém zařízení typu Nanospider, Spin Line a Fiber Engine FS. Proto následující kapitoly budou věnovány elektrostatickému a odstředivému zvlákňování a dále výrobním zařízením, na kterých vznikaly nanovláknenné vrstvy. V neposlední řadě bude věnována pozornost polymerům PU a PA 6, jelikož tyto polymery byly výchozí pro výrobu nanovláken. Důvodem je snadná vyrobiteľnost a opakovatelnost.

Elektrostatické zvlákňování je jeden z několika způsobů přípravy ultrajemných vláken z polymerního roztoku nebo taveniny za pomoci elektrostatických sil.

5.1.1 Historie elektrostatického zvlákňování

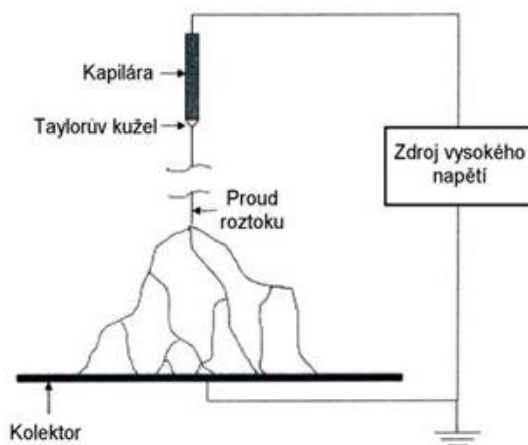
Jako první si vlivu elektrostatického pole působícího na kapalinu všiml mnich William Gilbert, a to na počátku 17. století. Při pokusu s ebonitovou tyčí a kapkou vody umístěnou na podložce pozoroval pohyb kapky směrem k nabitě tyči. V roce 1914 John Zeleny (původem Čech) působící na Minnesotské univerzitě vynalezl jednoduchý spinner. Mezi lety 1934 až 1944 publikoval Formhals řadu patentů [29-33]. V roce 1952 bylo vynalezeno Vonnegutem a

Neubauerem elektrostatické rozprašování (electrospraying), díky kterému byli schopni vyrábět proudy vysoce elektrizovaných jednotlivých kapiček o průměru cca 0,1 mm. V roce 1966 bylo Simonem patentováno zařízení elektrostatického rozprašování, které bylo schopné produkovat ultra tenká a velmi jemná vlákna pro netkané textilie. Kladná elektroda byla ponořena přímo do polymerního roztoku a záporná byla připojena ke sběrnému ústrojí. Následovala řada výzkumů zabývajících se zvlákňováním různých polymerů [34]. Koncem sedmdesátých let bylo patentováno zařízení nazvané drátový stroj. V roce 2004 bylo Technickou univerzitou v Liberci patentováno zvlákňovací zařízení nazvané Nanospider [35].

5.1.2 Princip elektrostatického zvlákňování

Na obr. 12 je znázorněno jedno z možných uspořádání zvlákňovacího zařízení, kde je svisle umístěná kapilára a pod ní kolektor. Polymerní roztok odkapává z kapiláry vlivem gravitace a elektrického pole, tím se získávají submikronová vlákna (v rozsahu do 1000 nm), ukládající se na povrch kolektoru.

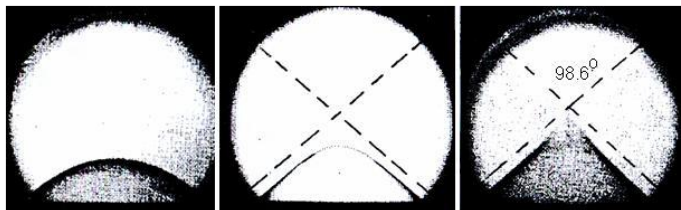
V procesu elektrostatického zvlákňování je využito stejnosměrné elektrostatické pole o vysoké intenzitě k vytvoření nabitého proudu polymerního roztoku nebo taveniny. Jedna elektroda je v podobě úzké kapiláry a je spojena přímo s polymerním roztokem a druhá (často nazývaná kolektor) je v podobě např. destičky, která je plochou stranou postavena proti vrcholu kapiláry.



Obr. 12: Schéma jednoduchého zvlákňovacího zařízení [35]

Polymerní roztok je vystaven vysokému elektrickému napětí. Dojde k indukci elektrického náboje v povrchové vrstvě roztoku a pokud je elektrické pole dostatečně silné, je překonáno povrchové napětí kapaliny. Na hladině polymeru dojde k tvorbě Taylorových kuželů, obr. 13. Následuje vytlačování nabitě kapaliny. Vytažené vlákno se při cestě ke

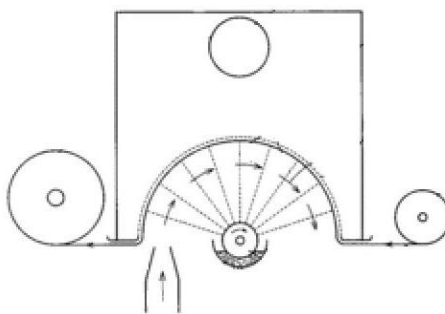
kolektoru dlouží a štěpí. Vlákná ztuhnou po odpaření rozpouštědla a na kolektor již dopadají suchá vlákna, tvořící vláknennou vrstvu [35, 36].



Obr. 13: Tvorba Taylorova kuželu na hladině kapaliny v silném elektrostatickém poli [37]

5.1.3 Nanospider

Nanospider je technologie, kterou v roce 2004 vyvinula a patentovala Technická univerzita v Liberci (katedra netkaných textilních). Je to technologie, která umožňuje průmyslovou výrobu jednotlivých kontinuálních nanovláken (velikosti 200 až 500 nm) z různých polymerů. Tato technologie je založena na tom, že Taylorovy kužely je možné vytvořit na tenké vrstvě polymerního roztoku. Tato metoda nevyužívá žádné trysky či zvlákňovací kapiláry jako v předchozím případě, ale je založena na rotující elektrodě tvaru válce. Na obr. 14 je znázorněno schéma nanospideru. Elektroda ve tvaru válce je částečně ponořena do polymerního roztoku, nad ní je umístěna protielektroda (kolektor), po které je vedena podkladová textilie, na které se vytváří nanovlákná ve formě netkané textilie [36].

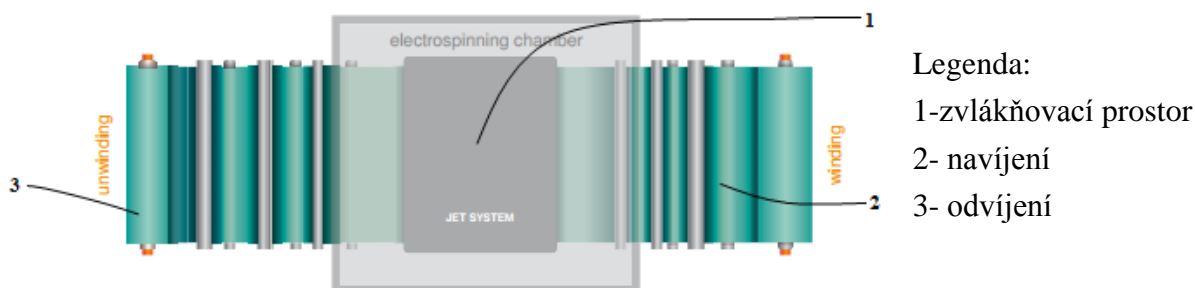


Obr. 14: Zařízení Nanospider pro výrobu nanovláken elektrostatickým zvlákňováním [36]

5.1.4 Spin Line 120

Spin Line 120 je název pro průmyslovou linku, která byla vyvinuta českou firmou Spur a.s. se sídlem ve Zlíně. Stejně jako Nanospider, tak i Spin Line 120 pracuje na základě elektrostatického zvlákňování. Ovšem na rozdíl od Nanospideru, kde jako hlavní zvlákňovací elektroda je válec nebo struna, tak u linky Spin Line je hlavní zvlákňovací elektrodou tryska. Principem je umístění v šíři zvlákňovacího stroje více trysek vedle sebe tak, aby se dosáhlo

vysoké produktivity výroby nanovláken. Obecně je tento způsob výroby celosvětově nejrozšířenější [38]. Schéma stroje je uvedeno na obr.15.

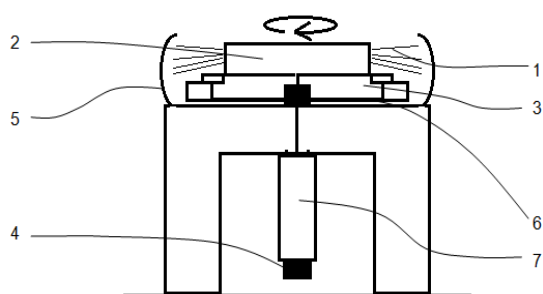


Obr. 15: Spin Line 120 [38]

5.1.5 Odstředivé zvlákňování

Odstředivé zvlákňování, nebo-li Forcespinning™ na rozdíl od elektrostatického zvlákňování nevyužívá žádné elektrostatické síly ke vzniku nanovláknů. Odstředivé zvlákňování využívá ke vzniku nanovláken odstředivé síly. Díky tomu je možné používat jak vodivé, tak nevodivé roztoky polymerů a polymerní taveniny, jelikož nanovláknů může vzniknout bez potřeby elektrických polí. Produktivita by podle Zachary McEachina měla být 1 g/min s využitím jedné zvlákňovací hlavy v laboratorním měřítku na rozdíl od elektrostatického zvlákňování, kde je produktivita 0,3 g/h. Morfologie nanovláken, která vznikla pomocí odstředivého zvlákňování, je závislá na parametrech uspořádání zařízení, jako je například roztok/viskozita taveniny, průměr otvoru a metoda sběru vláken.

Hlavními komponenty systému jsou zvlákňující tryska, tepelný systém, sběrné zařízení, kryt stroje, řídicí systém, motor a brzda. Řídicí systém má na starosti rychlosti zadané uživatelem. Ve spodní části stroje je umístěn motor. Zvlákňovací tryska je připojena na konec hřídele pomocí závitového spoje. Tepelný systém zahrnuje vytápění pro tavení a chlazení pro provoz při nízkých teplotách. Kryt stroje umožňuje zachování podmínek zvlákňovacího prostředí, včetně vakua a inertních plynů [39]. Schéma zařízením je znázorněno na obr. 16.



Legenda:

- 1 - vznikající nanovláknko
- 2 - spinneret
- 3- pec
- 4- brzda
- 5 - zachytávač nanovláken
- 6 - ohříváč
- 7- motor

Obr. 16: Schéma zařízením na odstředivé zvláknování

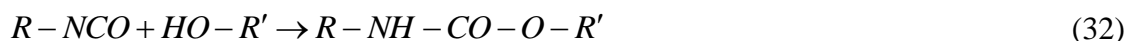
5.2 Suroviny pro výrobu nanovláknenných membrán

5.2.1 Polyuretany

Když před druhou světovou válkou dosáhli Američané zásluhou W. H. Carotherse nečekaného úspěchu v oboru syntetických vláken svým nylonem, snažili se Němci jejich náskok vyrovnat. Pokusili se připravit nový polymer založený na reakci mezi isokyanátovou skupinou a hydroxylem. Výsledkem bylo syntetické vlákno s názvem Perlon U, avšak nebylo schopno konkurovat nylonu. Zato však nečekaně došlo k objevu, který předčil pouhou napodobeninu nylonu, a to k objevu polyuretanových pěn, pryží a polyuretanových laků a lepidel. Úspěch byl založen na vlastnostech isokyanátové skupiny, která reaguje s aktivním vodíkem hydroxylových skupin tak snadno, že spojení monomerů v obrovské makromolekuly probíhá rychle i za normálních podmínek [19].

Chemie polyuretanů

Pod pojmem polyuretany rozumíme skupinu polymerů vznikajících reakcí vícefunkčních isokyanátů s polyalkoholy. Reakcí isokyanátů s alkoholy vznikají uretany – estery kyseliny karbamové.

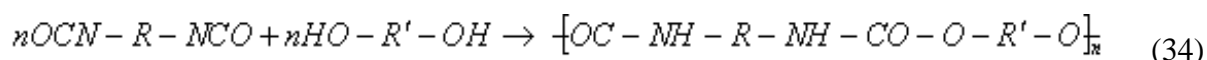


Tato hlavní růstová reakce je často doprovázena vedlejšími reakcemi, kterými vznikají jiné než uretanové strukturní jednotky. Isokyanáty reagují totiž s mnoha sloučeninami obsahujícími aktivní vodíkové atomy.



Jednotlivé sloučeniny s aktivním vodíkem lze podle klesající reaktivity s isokyanáty sestavit do řady: alifatické aminy > aromatické aminy > alifatické substituované močoviny >

primární alkoholy > sekundární alkoholy > voda > fenoly > aromatické substituované močoviny. Pro praxi je důležité, že se reakce isokyanátů s polyhydroxysloučeninami musí provádět ve zcela bezvodném prostředí, neboť jinak dochází k odštěpování CO_2 a ke vzniku močovinových vazeb. Relativní rychlosti primárních, sekundárních a terciárních alkoholů s isokyanáty jsou asi v poměru 1 : 0,03 : 0,005. Reakce alkoholů s aminy probíhají za teploty cca 20°C kvantitativně za silného tepelného zbarvení a nevznikají při nich žádné vedlejší produkty. Pro přípravu polyuretanů je nutno vycházet z di- nebo polyisokyanátů a polydroxysloučenin. Tak z diisokyanátu a diolu vzniká lineární polyuretan:

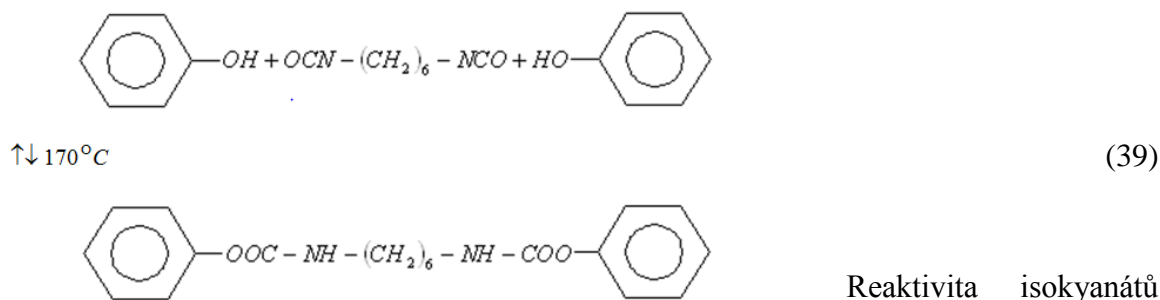


Kombinací různých polyisokyanátů a polyalkoholů je možno připravit produkty nejrozličnějších vlastností.

Adiční reakce isokyanátů s polyalkoholy se dají katalicky urychlit přidávkou sloučenin cínu a terc. aminů. Teplota disociace urethanové vazby závisí na povaze skupin spojených s touto vazbou. Různé urethany jsou prakticky stabilní do těchto teplot:



Rozdílné tepelné stability různých urethanových skupin se využívá v praxi. Z polyisokyanátů lze reakcí s fenoly, kaprolaktamem aj. připravit tzv. maskované isokyanáty, které jsou za normální teploty úplně indiferentní vůči vodě a sloučeninám se skupinami $-OH$. Zahřátím na teplotu rozkladu se odštěpuje maskovací činidlo a vzniká volný isokyanát, který může reagovat s přítomnými polyoly na polyuretan:



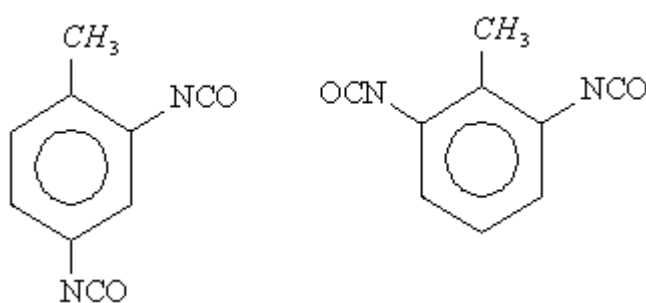
vzrůstá v pořadí hydroaromatické-alifatické-aromatické isokyanáty. Uplaňuje se i vliv substituentů a sterického uspořádání [20].

Výchozí suroviny

Základními surovinami pro přípravu PUR jsou polyisokyanáty a polyoly.

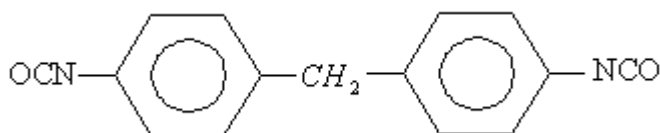
Technicky důležité polyisokyanáty

Přibližně 95 % produkce polyuretanů je založeno na aromatických polyisokyanátech, které jsou podstatně reaktivnější než alifatické. Dominují diisokyanatotoluen a siisokyanatodifenylmethan. 2,4 – a 2,6-diisokyanatotolun [2,4- a 2,6 –toluylendiisokyanat, TDI (3.3/1), (40)] přichází na trh jako směs s obsahem 2,4-izomer. Tato směs se používá převážně pro výrobu měkkých pěn a zčásti i elastomerů.



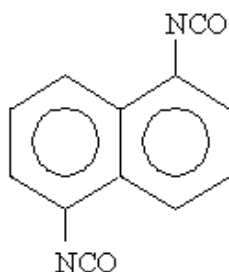
(40)

Pro přípravu elastomerů a pro polotvrdé a tvrdé integrální pěny slouží 4,4-Diisokyanatodifenylmethan [4,4-difenylmethandiisokyanát, MDI (3.3/2), (41)] o b. t. 39,5°C slouží pro přípravu elastomerů a pro polotvrdé a tvrdé integrální pěny.



(41)

1,5-Diisokyanatonaftalen [1,5-naftylendiisokyanát (3.3/3)] o b. t. 127°C je vysoce reaktivní a používá se pro mechanicky náročné elastomery:



(42)

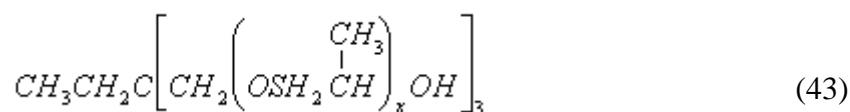
Nevýhodou aromatických diisokyanátů je tendence jejich produktů ke žloutnutí na světle. Tento nedostatek nevykazují alifatické a cykloalifatické diisokyanáty [20].

Polyoly

V chemii polyuretanů se jen výjimečně jako druhá složka používají monomerní dioly. Téměř vždy se používají oligomerní až polymerní produkty s koncovými hydroxylovými skupinami. Důvody pro to jsou ekonomické i technické. Polyalkoholová složka pro přípravu polyuretanů je podstatně levnější než složka isokyanátová. Se stoupající molekulovou hmotností polyalkoholové složky klesá potřebné množství složky isokyanátové, a tím klesají celkové náklady na produkt. Z použitelných polyalkoholových složek přichází v úvahu polyetheralkoholy a polyesteralkoholy.

Polyesteralkoholy se připravují polyesterifikací dikarboxylových kyselin (především kyseliny adipové a ftalanhydridu) a přebytku diolů (diethylenglykolu, 1,4-butandiolu, 1,6-hexandiolu, neopentylglykolu), aby konce řetězců byly obsazeny skupinami hydroxylovými. Částečnou náhradou diolu triolem se získávají rozvětvené produkty. Polyestery používané pro výrobu polyuretanů mají zpravidla M 2000 až 4000 a hydroxylové číslo 50 až 600 mg KOH na 1g. Jejich viskozita je při normální teplotě 20 až 40 Pa.s. Produkty vytvrzované polyestery mají vyšší odolnost proti povětrnosti a zvýšené teplotě i vyšší tvrdost. Nevýhodou je jejich snazší hydrolyzovatelnost.

Polyetheralkoholy se připravují polymerací propylenoxidu nebo jeho směsí s ethylenoxidem. Podle inicující látky, na kterou se propylenoxid aduje, se získané produkty liší funkcí. Z vody a propylenoxidu vzniká lineární polyetherdiol. Použije-li se inicující látka více aktivními vodíky, získají se rozvětvené vícefunkční polyetheralkoholy. Tak s trimethylolpropanem vznikají trojfunkční polyetheralkoholy [20].



Polyuretanová vlákna

Technicky nejsnáze přístupný a současně nejvýznamnější lineární polyuretan vzniká z hexamethylendiisokyanátu a 1,4-butandiolu o $\bar{M} = 7000$ až 12000. Polyadici lze provádět buď přímo, nebo v prostředí rozpouštědla. V roztoku zůstanou nízemolekulární podíly a vedlejší cyklický dimer. Polyuretan z hexamethylendiisokyanátu a 1,4-butandiolu je bílá hmota podobná polyamidu, má bod tání 184 °C. Je silně krystalický, tepelně není příliš stálý a při teplotách nad 220 °C se začíná rozpadat na jednotlivé komponenty. Proti polyamidům mají lineární polyuretany nižší navlhavost, lepší odolnost proti vodě, kyselinám a

povětrnostním podmínkám a lepší elektroizolační vlastnosti. Za chladu jsou rozpustné ve fenolech, kyselině mravenčí a sírové. Oproti polyamidům mají vlákna drsnější omak, příliš rychle krystalizují, špatně se barví a silně se nabíjejí statickou elektřinou [20].

5.2.2 Současný stav výroby nanovláknenných membrán z PU

V kapitole 5.1 Přehled současného stavu nanovláknenných membrán je uvedeno několik prací v oblasti výroby nanovláknenných membrán z PU pro sportovní, outdoorové a armádní účely. Častým důvodem použití PU je jeho snadná vyrobiteľnosť pomocí elektrostatického zvlákňování a jeho elastické schopnosti oproti jiným polymerům, které se používají k výrobě membrán do oblečení. Právě zmiňované elastické vlastnosti PU jsou velkým potenciálem pro jeho využití v oblasti nanovláknenných membrán.

5.2.3 Polyamid 6

Polyamidy jsou lineární polymery typické s hlavním polymerním řetězcem, v kterém se pravidelně střídají dusíkaté skupiny $-CO-NH-$. Vyrábějí se na základě technické polymerace:

- polykondenzace aminokarboxylových kyselin
- polymerace jejich cyklických amidů (laktánů)
- polykondenzace diaminů s dikarboxylovými kyselinami

Z této řady vznikají polykaprolaktam, obecně označovaný polyamid 6, polyamid 11, polymerací laktamu kyseliny 12-aminododekové vzniká polyamid 12.

V této řadě také vzniká polykondenzát hexamethylendiaminu s kyselinou adipovou pod označením polyamid 6.6.

Čísla za označením polyamidu charakterizují výchozí polymery podle počtu atomů uhlíků v jejich molekulách (polymerace kaprolaktamu, cyklické sloučeniny s šesti atomy uhlíku v molekule, vznikne polyamid 6. Polyamid 6 byl objeven v roce 1938 Paulem Schlackem.

Jako základní surovina pro výrobu vláken z polyamidu 6 se používá fenol, který se mění na cyklohexanol, následuje cyklohexanon, cyklohexanonoxim a pak Beckmanův přesmyk na kaprolaktam. Teplota tání kaprolaktamu je 70 °C. Polymerací vzniká směs kaprolaktamu s vodou a ohříváním na 220 °C v inertní atmosféře. Surový hydrolytický polyamid obsahuje vždy volný 6-kaprolaktam, který se musí zbavit vypíráním granulí vodou nebo odpařením z taveniny. Zvlákňování probíhá bez přístupu vzduchu a teplota tavení je 270 °C.

Polyamid 6 je rozpustný jen ve fenolech, kyselině mravenčí a koncentrované kyselině octové [76, 77].

Charakteristickými vlastnostmi hydrolytického polyamidu 6 jsou:

- malá hořlavost
- vysoká odolnost v oděru
- vysoký elektrostatický náboj – vyšší špinavost
- nízká mačkovatost

5.2.4 Současný stav výroby nanovláknenných membrán z PA 6

Kromě již zmíněného PU se při výrobě nanovláknenných membrán použil PA 6. Důvodem použití PA 6 k výrobě nanovláknenné membrány je:

- snadná vyrobiteľnosť pomocí elektrostatického zvlákňování
- rychlost výroby, která je dvounásobná oproti PU
- na rozdíl od PU není potřeba k jeho výrobě toxický DMF

Z předchozí rešerše v kapitole 5.1 Přehled současného stavu nanovláknenných membrán víme, že u většiny nanovláknenných membrán pro sportovní, outdoorové a armádní účely je používán již zmíněný PU. Kromě zmíněné práce Philipa Gibsoma, který vyrobil nanovláknennou membránu z PA 6.6 a dvou patentů US 20080220676 A1 a US 20110092122 A1, které pouze uvažují o možnosti výroby nanovláken z PA 6. Nanovláknenná membrána z PA6 nebyla dosud vyrobena.

Existují nanovláknenné membrány z PA 6, avšak pro filtrační či separační účely, jako např. v práci Enroca Marsana, který použil PA 6 v 2,2,2 TFE pro výrobu nanovláknenné membrány pro separační účinky pomocí elektrostatického zvlákňování. Koncentrace PA 6 byla od 6,5 do 10%. Ke zvlákňování byla použita zvlákňovací jehla. Podmínky zvlákňování byly vzdálenost jehly od kolektoru 15cm a napětí od 5 do 30 kV. Výsledkem byla vlákna s průměrem od 100 do 600nm [42]. Stejně Lei Shi popisuje výrobu nanovláknenné membrány pro filtrační účely z PA 6, ovšem ne elektrospinnigem, ale pomocí stlačeného vzduchu, který proudí přímo do zvlákňovacích trysek. Koncentrace PA 6 je od 14 do 20% a průměr vláken od 150 do 750nm [43]. Yin Guibo použil PA 6 pro výrobu nanovláknenné membrány pro filtrační účely. Použil PA6 a kyselinu mravenčí o koncentraci 98%, koncentrace roztoku byla 13%. Pomocí elektrostatického zvlákňování z jehly při vzdálenosti jehly od kolektoru 8 cm a napětí

16 kV vznikla nanovláknna s průměrem $177\pm 39\text{nm}$ [44]. Matthew M. Mannarino se zabývá ve své práci studií mechanických vlastností nanovláknenné membrány z PA6. PA 6 byl smíchán s DMF. Bylo využito elektrostatického zvláknování z jehly se vzdáleností od kolektoru 25cm a s napětím 22 kV [45]. Kuitian Tan se zabýval vytvořením antibakteriální nanovláknenné membrány z PA6 a jako v předchozích případech byla kyselina mravenčí použita jako rozpouštědlo. Bylo využito elektrostatického zvláknování z jehly při vzdálenosti od kolektoru 15 cm a při napětí 25 kV [46].

Z výše provedené rešerše je patrné, že se doposud nikdo hlouběji nezabýval výrobou nanovláknenné membrány z PA 6 pro sportovní, outdoorové či armádní účely.

5.3 Hydrofobizace nanovláknenné vrstvy

Přehled současného stavu problematiky ukazuje, že z hlediska komfortu je hydrostatická odolnost velmi důležitým parametrem. Bohužel samotná hydrostatická odolnost nanovláknenných vrstev vyrobená na výrobním zařízení typu Nanospider není příliš vysoká, dalo by se říci, že dokonce velmi nedostatečná se svými maximálně 30 cm. Naopak membrány např. od společnosti Gore-tex vykazují hydrostatickou odolnost i vyšší jak 18 000 mm. Proto se další kapitola zabývá zvýšením hydrostatické odolnosti pomocí hydrofobizace nanovláknenné vrstvy.

5.3.1 Hydrofobní úprava

Hydrofobní úprava je zcela běžná textilní úprava. Úprava se provádí na materiály, které mají za úkol odolávat vodě, jako např. tkaniny na pláště a další oděvy do deště, deštníky, tkaniny na stany, plachty atd. Úprava je založena na ovlivnění nasákavosti a vzlínivosti plošného textilního materiálu.

Vzlínavost chápeme jako schopnost plošné textilie přijímat vodu kapilárně. Svisle orientovaný vzorek textilního materiálu se spodní částí ponoří do vody po dobu 30 minut a změří se výška vzlínání vody textilií.

Hydrofobitu chápeme jako schopnost plošné textilie odpuzovat vodu. Existuje několik způsobů měření, jako např. Spray test (viz kapitola 6.1.4 Zjištění hydrofobity – Spray test) či měření kontaktního úhlu smáčení (viz kapitola 6.1.5 Stanovení úhlu smáčení)

Nejvyšší hydrofilitu vykazují přírodní vlákna, pokud navíc odstraníme tuky a vosky, jejich sorpční vlastnosti se zvyšují. Naopak syntetická vlákna obecně vykazují daleko menší

schopnost sorpce vody a navíc, pokud jsou z těchto vláken vyrobené tkaniny s hustou dostavou, mohou být vodoodpudivé.

Rozlišujeme tyto hydrofobní úpravy:

- waterrepellent: povrchová úprava impregnací, kalandrováním nebo napuštěním. Při kratším dešti se udělají kapičky, které sklouznou po povrchu. Při větší zátěži už voda proteče (přibližně 0,5 m v.s.).
- waterresistant: vrstvené materiály, zátěrované (zátěr na bázi polyuretanu, fluorkarbonu, teflonu, akrylu). Materiály jsou vodovzdorné, vydrží tlak vodního sloupce cca 1,1 m.
- waterproof: vodotěsné a vysoce nepromokavé materiály, které odolávají tlaku vodního sloupce nad 1,3 m (zátěry, membrány).

Waterrepellent úpravy se vyznačují tím, že vůbec, či velmi málo ovlivňují prodyšnost a paropropustnost upravovaného materiálu. Stejně tak i omak by měl být nezměněn. Tento typ úpravy se používá na vrchní tkaniny určené především pro oblečení do deště.

Naopak, úpravy typu waterresistant a waterproof výrazně ovlivňují prodyšnost a paropropustnost, avšak mají daleko vyšší hydrostatickou odolnost. Dále ovlivňují i ohybovou tuhost materiálu, jelikož se jedná o vrstvení (zátěry) či laminování (membrány) vrchních materiálů. Především zátěry jsou oproti membránám velmi málo paropropustné, a tím se nošení takového zátěru stává nehygienickým. Pro tuto vlastnost se zátěry používají například u plachtovin či svrchních oděvů, ale pouze na místní použití (např. sedla, náramenice, zesílení v namáhavých místech – kolena), dále u batohů a stanů. U zátěrových materiálů existuje mnoho technologických a kvalitativních provedení, jejich výhodou oproti membránovým materiálům je nižší cena.

Velmi často se kombinuje úprava waterrepellent s waterproof materiály. Samotná waterproof úprava sice vykazuje vysokou hydrostatickou odolnost, avšak samotná vrchní tkanina nasákne vodu, a tím se oděv stává méně komfortní. Snižuje se jeho schopnost odvádět vodní páru od těla člověka, jelikož jsou póry ucpané vodou a takový oděv je nejen lehčí, ale i rychleji schne. Pokud bychom však použili pouze waterrepellent úpravu, sice by odolala slabšímu dešti, avšak při dlouhodobém působení vody a tlaku dojde k průniku vody k člověku, a tím se výrazně snižuje komfort oblečení.

Kritérium hydrofobnosti je dotykový úhel mezi kapalinou a plošnou textilií. Pokud je úhel 90° , je povrchové napětí textilie nižší a textilie je hydrofobnější. Z toho tedy vyplývá, že

textilie musí mít nižší povrchové napětí, má-li být hydrofobní, a toho dosáhneme pomocí hydrofobizačních prostředků.

Pro dosažení co nejlepší hydrofobizační úpravy plošných textilií je důležitý stav textilie před samotnou úpravou. Důležité parametry jsou: hustota dostavy tkaniny, odstranění hydrofilních zbytků z předchozích úprav, dále odstranění zbytků barviv, šlicht atd. Proto je potřeba věnovat velkou pozornost vyváře a používat aniontová smáčedla a prací prostředky, jelikož neaniontová smáčedla jsou těžší a snižují kvalitu hydrofobní úpravy [48].

5.3.2 Chemické látky používané pro hydrofobizaci

V patentu USA z roku 1956 se uvádí použití hlinitých mýdel pro hydrofobizaci plošných textilií. Od té doby vzniklo nejen mnoho patentů týkajících se hydrofobizace plošných textilií.

V dnešní době se nejčastěji používají tyto chemické látky:

- parafinované emulze s hlinitými nebo zirkoničitými solemi
- deriváty vyšších mastných kyselin
- silikony
- perfluoralkany

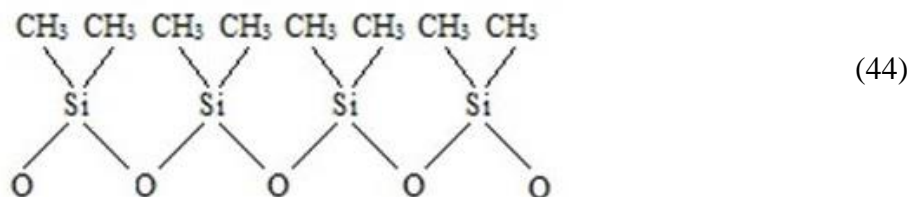
Blíže jsou popsány silikony a perfluoralkany, které se používaly pro hydrofobizaci nanovlákněných vrstev za účelem navýšení hydrostatické odolnosti [48].

Silikony

Hydrofobizace na základě silikonů je velmi kvalitní, může se aplikovat na všechny textilní materiály bez ohledu na použitý druh vláken. Stálost hydrofobní úpravy na bázi silikonů z hlediska praní a čištění je velmi dobrá. Upravené textilie mají měkký, hladký omak a jsou relativně stále proti chemickým a povětrnostním vlivům. Ovšem, i silikonové úpravy mají své nevýhody, a to především cenu, proto v dnešní době jsou více populární úpravy na bázi perfluoralkanů, o kterých je zmínka v další kapitole. K dalším nevýhodám patří nutnost velmi dobré předúpravy upravované textilie, vyžadují vysokotepeelné zpracování a mohou snižovat stálost vybarvení při otírání.

Hydrofobizační prostředky na bázi silikonů obsahují polymery siloxanů, a to polymetylhydrosiloxan, a nebo polydimetylsiloxan, případně směsi obou typů. Metylové skupiny siloxanů jsou nositeli hydrofobních vlastností, avšak, aby se docílilo pokud možno co nejlepší hydrofobních vlastností, musí být molekuly siloxanů orientované. Kyslík siloxanů by

měl být orientovaný směrem k textilii a metylové skupiny směrem od povrchu textilie. Schéma orientace molekul siloxanů na textilii při hydrofobní úpravě je znázorněno níže:



Siloxany mají schopnost prostorově se zesítovat, a tím se vytvoří film kolem vlákna, který je pravidelně obklopuje.

Dále se pro polymeraci siloxanů a orientaci metylových skupin používají anorganické a organické katalyzátory. Z organických sloučenin se používají ve vodě rozpustné soli zirkonu, cínu, titanu a hliníku. Zirkon a cín se používají ve směsi s octanem sodným, který při reakci vzniká. Katalyzátory na bázi organických sloučenin rozdělujeme na sloučeniny obsahující kovovou sůl a nekovové sloučeniny. Při použití katalyzátorů na bázi organických kovových sloučenin je hydrofobní úprava z metylpolysiloxanů obecně výhodnější, jelikož odpadají zinečnaté soli karboxylových kyselin. Dále je možné používat i organické sloučeniny typu polykondenzačních výrobků amidů. Katalyzátory ovlivňují celkové vlastnosti úprav. Výběr katalyzátorů je důležitý též při konečné kondenzaci polysiloxanů, která se uskutečňuje zahříváním napuštěné a usušené textilie na předepsanou teplotu. Obecně je možno říci, že organické sloučeniny reagují rychleji jak organické, a tím v případě kondenzace anorganických katalyzátorů stačí nižší teplota, nebo čas při ohřívání [49, 50].

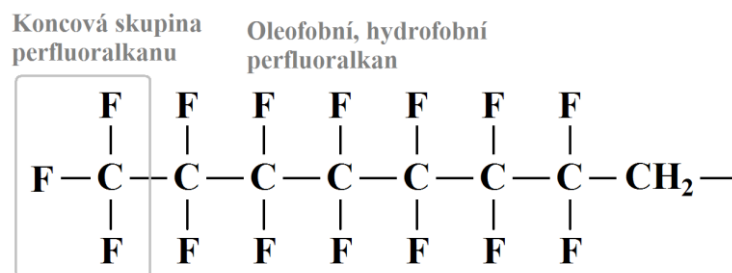
5.3.3 Fluorkarbonové úpravy

Fluorkarbony získáváme z ropy či zemního plynu. Fluorkarbony mají nejnižší povrchovou energii a narozdíl od ostatních hydrofobních přípravků nabízejí nejen hydrofobní, ale i oleofobní úpravu. Fluorkarbony jsou tvořeny perfluoralkylovými skupinami z akrylových nebo urethanových monomerů, které polymerizují přímo na upravovaném povrchu, tedy na vláknech. Je výhodné, aby finální polymer aplikovaný na vlákno měl koncovou skupinu CF_3 , tím je dosaženo maximální hydrofobnosti, nebo-li voduodpudivosti. Fluorkarbonový řetězec obsahuje 8 až 10 uhlíků. Dále mohou být na polymer navázány kopolymery (např. steryl – lauryl – methacrylat, butylakrylat nebo epoxyfunkční akryláty nebo bloky kopolymerů za účelem změny povrchových vlastností textilií atd.

Po aplikaci fluorkarbonu (obr. 17) je nezbytné upravenou textilii tepelně upravit pro docílení optimálnější úpravy, jelikož orientace perfluorořetězců je krystalické struktury.

Tepelná úprava je nezbytná po praní či chemickém čištění pro docílení co nejlepší orientace řetězce. Tepelnou úpravu, někdy nazývanou aktivace, je možné provést např. žehlením či sušením v sušičce. V dnešní době existují i fluorkarby, kde se jejich řetězce zregenerují teplotou okolí během sušení. Tyto nové fluorkarby jsou využívány především v oblasti bytových textilií. Avšak jejich účinnost a stálost není příliš vysoká.

Vývoj fluorcarbonů se začíná inspirovat přírodou, resp. dendrimery, které mají na svém povrchu listy [51, 52].



Obr. 17: Schéma řetězce fluorkarbonu

5.4 Plazma

Plazma je velmi důležitým prvkem existujícího světa. Definice pro fyzikální plazmu zní: Plazma je soubor nabitých i neutrálních částic v různých kvantových stavech, o kterém platí, že jeho prostorový náboj je přibližně roven nule (tuto vlastnost označujeme jako kvazineutralita). Částicemi pro tuto definici jsou elementární částice např. elektrony, ionty, neutrální atomy či molekuly. Rozlišujeme přitom plazmu izotermickou, pro kterou platí, že všechny typy částic mají stejnou teplotu, a neizotermickou, ve které teplota elektronů převažuje nad teplotou ostatních typů částic. Vznik izotermické nebo neizotermické plazmy závisí na způsobu, jakým byla plazmatu dodávána energie. Izotermicita bývá obvykle spojena s vysokou teplotou plazmatu, ale ne vždy je to podmínkou. Platí však, že neizotermické plazma v přírodě samovolně zaniká a musí se udržovat uměle.

V přírodě se můžeme s plazmou setkat např. ve sluneční soustavě resp. ve slunečním větru, v magnetosférách planet a komet. V okolí Jupitera a Saturnu plazma vytváří obří plazmové torusy. Hvězdy a slunce jsou samy o sobě plazmatické koule. Nejen hvězdy, ale i převážná většina mlhovin v galaxiích je tvořena rozsáhlými oblaky plazmatu, v nichž je možné pozorovat urychlování částic na vysoké energie a vyzařování způsobené různými mechanismy, což jsou další typické plazmové projevy.

Obecně se udává, že 99 % veškeré hmoty ve vesmíru existuje ve formě plazmatu. A plazma je považována za čtvrté skupenství hmoty [53, 54].

Langmuir byl první, který začal pracovat s plazmatem v roce 1928 s cílem vyvinout trubice, které by při nízkém tlaku vedly velké proudy. Trubice musely být naplněny ionizovaným plynem. S výbojem v plynech se dnes setkáváme ve rtuťových usměrňovačích, vodíkových thyatronech, jiskřištích, svařovacích obloucích, zářivkách, neonových trubicích a u blesku.

Obecně je velký zájem o ovládnutí řízené termojaderné syntézy. Mezi další technické aplikace plazmatu patří opracování materiálu (řezání, rozprašování), příprava tenkých vrstev (naprašování), leptání nebo plazmatická polymerace [54].

5.4.1 Atmosférická vs. nízkovakuová plazma

Jak už bylo uvedeno, výhody plazmy jsou dobře známy. Vytvářejí vysoké koncentrace reaktivních látek, které umožňují leptání a uložení tenkých vrstev s rychlostmi až do 10 m/min. Teplota plynu je obvykle nižší než 150 °C, takže tepelně citlivé podklady nejsou poškozené. Ionty vytvořené v plazmě mohou být urychleny směrem k substrátu a způsobit tak směrové leptání submikronových funkcí [55].

Nízkovakuová plazma

Nízkovakuová plazmová technologie je založena na plynu, který je ve vakuu a je aktivován přívodem energie. Ve vakuové nádobě je vytvořen tlak v rozmezí od 10^{-2} do 10^{-3} mbar s využitím vysokých vakuových čerpadel. Energeticky bohaté ionty a elektrony jsou vytvořeny společně s dalšími reaktivními částicemi, které tvoří plazmu.

+ Výhoda této metody nízkotlaké plazmy spočívá v dobře řízené a reprodukovatelné technice.

- Jsou drahé a náročné na údržbu, mají omezení co do velikosti vzorku (záleží na velikosti vakuové komory [55]).

Atmosférická plazma

Atmosférická plazmová technologie je založena při atmosférickém tlaku, plyn je aktivován prostřednictvím vysokého napětí takovým způsobem, že vzniká plazma. Stlačený vzduch pak žene plazmu z trysky směrem k substrátu. Jedná se o nejstarší a nejrozšířenější plazmový proces.

Charakteristika:

+ Využití atmosférického tlaku, plyn či činidlo je často okolní vzduch.

- Obtížnost udržení záře výboje za předem definovaných podmínek, plazma nepronikne hluboko do vláken či tkaniny, takže jejich účinky na textilu jsou omezené a krátkodobé. V podstatě atmosférický typ plazmy je příliš slabý.

Pro tuto práci byla plazma využita pro hydrofobizaci nanovlákněné membrány, jelikož běžné metody (fulár, postřik či kalandr) nevedl ke kladnému výsledku. Vzhledem k nevýhodám atmosférické plazmy co do stálosti a homogenity úpravy povrchu byla použita nízkovakuová plazma typu roll-to-roll [55].

5.4.2 Nízkovakuová plazma typu roll-to-roll

Jak již bylo uvedeno, veškeré experimenty pro potřeby této disertační práce byly provedeny za pomoci nízkovakuové plazmy typu roll-to-roll. Jedná se o typ plazmy, která je schopna upravit návin, který je umístěn na plastové dutince. Šíře návinu na dutince se pohybuje od cca 0,5 m s průměrem návinu od 0,3 m. Zařízení se skládá z převíjecího a odvíjecího zařízení a samozřejmě ze samotné plazmy. Je zřejmé, že tento typ zařízení je mnohem více složitější než systém skládající se z jednotlivých kazet, proto je nezbytné i kontrolní zařízení na převíjení samotného návinu. Samotná vakuová komora se skládá z několika dvojic elektrod, které jsou umístěny mezi převíjecími se a odvíjecími se válci. Na obr. č. 18 je znázorněno průmyslové zařízení – nízkovakuová plazma typu roll-to-roll. Na obrázku můžeme vidět navinutou textilií, při spuštění stroje se stroj uzavře a vytvoří vakuum potřebné pro úpravu textilie.

Samotná úprava začíná odčerpáním vzduchu z vakuové komory a následně je aplikován plyn (v případě disertační práce fluorkarbon) a dochází k samotné plazmatické úpravě. Samotná rychlost převíjení se pohybuje od 0,5 do 10 m/min [55].



Obr. 18: Nízkovakuová plazma typu roll-to-roll [55]

5.4.3 Hydrofobní úprava textilních povrchů pomocí plazmy

Tato kapitola se bude věnovat úpravě textilních povrchů za účelem zvýšení nejen hydrofobity, ale též i oleofobity. Velkou výhodou oproti běžně známým textilním úpravám (fulár, kalandr atd.) je, že se může upravit hotový oděv, tím se povrchově upraví nejen samotná tkanina, ale též i zipy, švy a další spojovací materiál. Další velkou a nespornou výhodou je, že při úpravě plazmou není zapotřebí používat kapaliny na bázi vody a tu následně zahřívat na vysokou teplotu a následně vynaložit další energii na usušení upravované tkaniny. Dále je zapotřebí daleko menší množství výchozí suroviny (chemikálií), to vede nejen k nižším nákladům na zpracování, ale i k nižším výdajům na odpady. Ovšem jak již bylo uvedeno, velkou nevýhodou plazmy je cena samotného stroje, ale i rychlost úpravy či údržba samotného stroje.

Nízkovakuová plazma může pracovat s hydrofobním prostředkem na bázi plynu, ale čím dál častěji se začínají využívat páry z kapaliny pro dosažení co nejlepších výsledků a možnosti reakce s dalšími látkami. Pro dosažení maximální hydrofobnosti a oleofobnosti je důležité připojit dlouhý fluorkarbonový řetězec na upravovaný povrch [55].

5.4.4 Rešerše aktuálního stavu zvyšování hydrofobity nanolákenných vrstev

Minglin Ma vytvořil základní přehled jak vytvořit superhydrofobní povrchy textilií. Jak autor uvádí, tvorba super hydrofobního povrchu je popisována v první polovině 90. let minulého století. Vzniká řada způsobů, jak zdrsnit povrch a docílit tak superhydrofobního povrchu. Jako předloha pro tvorbu superhydrofobního povrchu slouží povrch lotosového květu. Smáčecí úhel je vyšší jak 160° , což je docíleno díky parafinovým voskovým krystalům, které obsahují převážně CH_2 skupiny. Přírodní materiál nevyžaduje nižší povrchovou energii z $-\text{CH}_3$ skupin nebo fluorovaných uhlovodíků k dosažení superhydrofobního povrchu. To jasně ukazuje, že velmi nízká povrchová energie není nezbytná pro dosažení nesmáčivého povrchu, jedná se spíše o schopnost řídit morfologii povrchu v oblasti mikronů či nanometrů [57].

Navíc docílení superhydrofobních vlastností lze dosáhnout i jinými materiály, než jsou silikony či fluorkarbony. Mohou to být i například organické materiály. Fluorované uhlovodíky a silikony jsou známé jako hydrofobní materiály. V přírodě je dosahováno nesmáčení a samočištění pomocí parafinových uhlovodíků. V poslední době bylo prokázáno několik skupin superhydrofobních povrchů, které byly vyrobeny z organických materiálů. Některé anorganické materiály byly rovněž převedeny do superhydrofobních

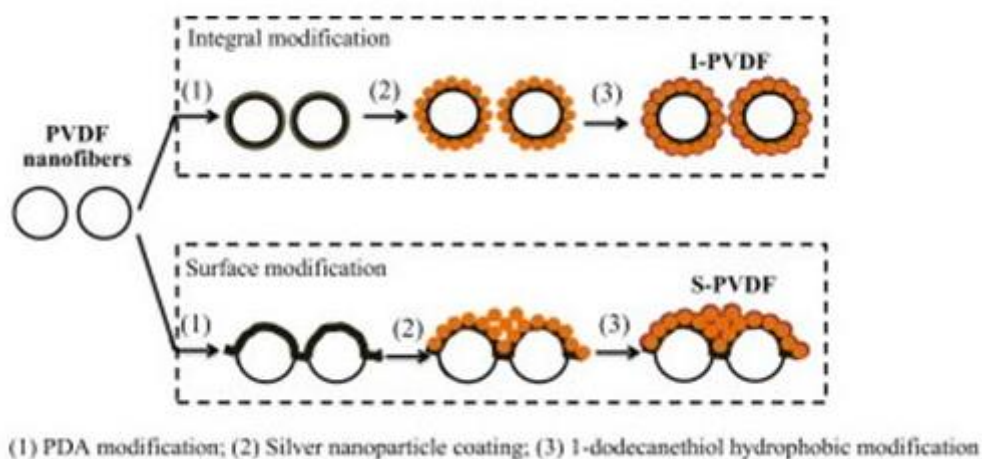
povrchů. Například superhydrofobní povrchy byly vyrobeny ze ZnO a TiO₂. Existují další metody jak vytvořit superhydrofobní povrch. Jedná se o zdrsnění povrchu materiálu s nízkou povrchovou energií. Většinou se jedná o jednokrokové procesy, které mají výhodu právě ve své jednoduchosti, ale jsou vždy omezeny pouze na malý soubor materiálů. Jak autor uvádí, k docílení drsnosti povrchu, a tedy i superhydrofobity, je možné dosáhnout např. pomocí mechanického natahování reakce a plazmové úpravy, chemického leptu, litografie, zpracování sol-gel, koloidní montáže, chemického ukládání nanovláken [56].

Daewoo Han využila koaxiálního zvlákňování k výrobě superhydrofilních nanovláken. K výrobě byl použit teflon jako plášť a jádro vlákna tvořil polykaprolaktam (PCL). Díky koaxiálnímu zvlákňování resp. kombinaci jádro/plášť, je možné elektrostaticky zvláknit teflon, který obvykle není vhodný k elektrospinningu, jelikož jeho nízká dielektrická konstanta brání k jeho dostatečnému nabití [58].

Hyeon Yoon se zabývá tvorbou superhydrofobního povrchu pomocí nanovláken, resp. elektrospinningu a elektrospreyngy. Jako výchozí polymer byl použit kaprolaktam a DMC jako rozpuštědla v poměru 20:80. Superhydrofobity bylo docíleno v obou případech, avšak u elektrospreyngy, tedy u aplikace kapiček, došlo k lepším výsledkům. Bylo dosaženo smáčecího úhlu okolo 150° [59].

V práci Y Liao se zabývá výrobou nanovlákněné membrány z PVDF spolu s DMF a acetonem. Takto připravený roztok byl míchán jeden den při konstantní teplotě 60°C. Připravený roztok se zvlákňoval pomocí trysky při napětí od 25 do 30 kV a vzdálenost jehly od kolektoru byla v rozmezí od 12 do 15 cm. Výsledkem je kontaktní úhel od 136 do 142°. Výsledkem této práce je vyšší hydrofobita povrchu díky jeho drsnosti [46]. Další vliv na hydrofobní vlastnosti dle této práce je i samotná vlhkost během zvlákňování, resp. nižší vlhkost by měla přispět k lepší hydrofobitě povrchu nanovláken. Stejný autor se zabývá stejně jako v předchozím případě modifikací povrchu PVDF membrány. Složení roztoku je stejné jako v předešlém případě, zvlákňování proběhlo pomocí trysek při napětí 28kV a vzdálenost trysek od kolektoru byla 12 cm.

Následovala tvorba superhydrofobního povrchu nanovlákněných membrán. Ta zahrnuje tři kroky modifikace viz. obr. 19.



Obr. 19: Postup tvorby superhydrofobního povrchu [60]

Nanovlákné membrány byly nejprve potaženy polydopaminem (PDA), aby se zvýšila adhezní síla mezi vlákny a nanočásticemi stříbra, která byla uložena na povrchu vlákna na druhém stupni; (2) membrána byla potažena nanočásticemi stříbra pro optimalizaci morfologie a drsnosti membrány; (3) 1-dodekanthiol (C12) byl použit k reakci s nanočásticemi stříbra. Metoda modifikace PDA má být dle autora univerzální, protože jak uvádí, jeho použitelnost je vhodná pro mnoho typů materiálů a složitých tvarů z jednoduchých surovin za mírných reakčních podmínek a silné závaznosti [60].

Další možností, jak využít nízkou povrchovou energii PDMS, je použití blokového kopolymeru, jako je polystyren-b-dimethylsiloxan (PS-PDMS). Například Ma vytvořil superhydrofobní nanovlákné membrány pomocí elektrostatického zvláknování. Kontaktní úhel je 163° a dosáhne se díky kombinaci aplikace PDMS na povrchu vláken a drsností povrchu v důsledku malých průměrů vláken (150 nm až 400 nm). Textilní a biomedicínské aplikace by mohly využít této popisované metody [61].

Mehdi Jonoobi se zabýval přípravou celulósových nanovláken s hydrofobními vlastnostmi. Vytvořil acetylovaná celulósová nanovlákná a provedl proces acetylce. Výsledkem je, že acetylce změnila povrchové vlastnosti vláken z hydrofilní na více hydrofobní. [61]. Amit Kumar Gautam vytvořil polyamidovou nanovláknou membránu pro mikrofiltraci. Vyrobená nanovlákná membrána byla porovnávána s komerčními membránami typu PES a PVDF. Z výsledků vyplývá, že nanovlákná membrána dosáhla nejmenšího kontaktního úhlu, a to 41° oproti 86° s PVDF, a tím dosáhla nejlepších výsledků. [62]. Chien-te vytvořil fluorovaná uhlíková nanovlákná CNF působením tepelně chemického rozpadu par a použitím perfluorhexanu. Výsledkem je snížení povrchového napětí CNF a kontaktní úhel 166° [64].

Minyoung Lee použil atmosférickou plasmu pro zvýšení hydrofobity hedvábných fibrin pro medicínské aplikace. Jako hydrofobní prostředek byl použit fluorkarbon CF₄. Výsledkem je kontaktní úhel od 99,7° do 131°[52]. Balamurali Balu zvyšoval hydrofobitu celulózy biologicky odbouratelné. Superhydrofobita byla získána pomocí selektivního leptání amorfních částí celulózy v atmosférické plasmě a následně nanesením tenkých fluorovaných uhlovodíků též za pomoci plasmy. Výsledkem je úhel smáčení 166,7° [56]. Stejně tak Michael Lejune se snažil pomocí atmosférické plasmy leptat povrch ke zvýšení hydrofobity. Jednalo se o povrch křemíku a vytvoření větší drsnosti povrchu [65].

Anna Thorvaldsson zvýšila hydrofobitu celulózových vláken díky pokrytí povrchu mikrovlákných celulózových vláken celulózovými nanovlákný (za pomoci NaOH), tím bylo docíleno drsného povrchu, který je žádaný pro zvýšení hydrofobního povrchu a navíc byl tento kompozit vystaven atmosférické plasmě a byla nanese tenká vrstvička fluorkarbonu [66].

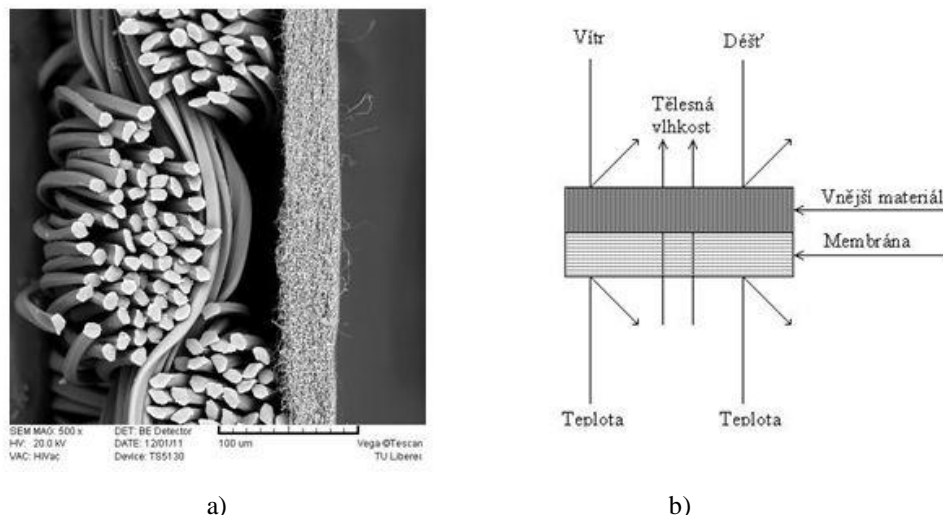
5.5 Laminace

Laminace je v textilu pojem pro spojení dvou a více tkanin, pletenin či netkaných textilií stejného či různého složení i určení (např. podšívka, vrchní materiál). Laminaci membrán si můžeme rozdělit do pěti základních skupin:

- Dvouvrstvý laminát (vrchní látka + membrána)
- Dvouvrstvý laminát s volnou podšívkou (vrchní látka + membrána + volná podšívka)
- Dvou a půlvrstvý laminát (vrchní látka+ membrána + půl vrstva)
- Třívrstvý laminát (vrchní látka + membrána + podšívka)
- Volně vložená membrána (Z-liner)

5.5.1 Dvouvrstvý laminát

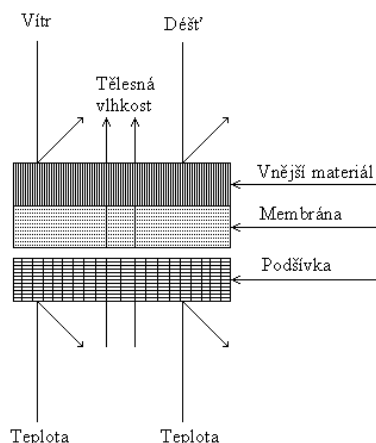
Laminace samotné vrchní látky a membrány má svá úskalí, a to především, že membrána není chráněná a dochází k jejímu poškození vlivem tření mezi nositelem a membránou a špatnou ochranou před znečištěním (např. potem atd). Samotná odolnost proti proniknutí vody je ovšem stejná jako u třívrstvého laminátu, avšak samotný laminát je lehčí a paropropustnější. V praxi se tento laminát prakticky nevyskytuje. Na obr. 20 můžeme vidět řez dvouvrstvým laminátem pod rastrovacím mikroskopem



Obr. 20: a) Řez dvou vrstevním laminátem, b) Schéma funkčnosti dvouvrstvého laminátu

5.5.2 Dvouvrstvý laminát s volnou podšívkou

Laminace vrchního materiálu a membrány společně s volnou podšívkou není již příliš běžná obr. 21. Důvodem je, že podšívka sice chrání membránu, ale jelikož není slaminována s membránou, dochází při nošení ke tření těchto dvou ploch a k následnému poškození membrány. Paroprupostnost je též horší, protože mezi podšívkou a membránou je vzduch, který významně ovlivňuje odpor vodních par (potu). Navíc technologické zpracování volné podšívky nepatří k nejjednodušším.

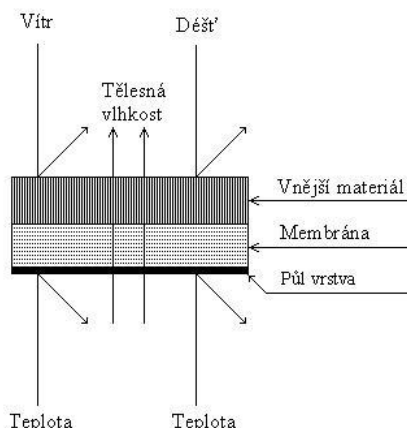


Obr. 21: Schéma dvou-vrstvého laminátu s volnou podšívkou

5.5.3 Dvou a půlvrstvý laminát

Nároky na nižší hmotnost celého outdoorového výrobku (např. bundy, kalhoty) jsou stále vyšší, proto se zavedl dvou a půlvrstvý laminát. V podstatě se jedná o laminaci vrchní látky s membránou a místo podšívky se použije ochrana membrány pomocí tisku či nánosem karbonových či jiných vláken jako například u firmy Gore s výrobní řadou Paclite.

Pozn.: Dvou a půlvrstvý laminát – jedná se o obchodní označení, ve skutečnosti se jedná o třívrstvý laminát (vrchní látka + membrána + tisk, netkaná textilie atd.). Ovšem pro lepší orientaci budeme používat označení dvou a půlvrstvý laminát viz. obr 22.



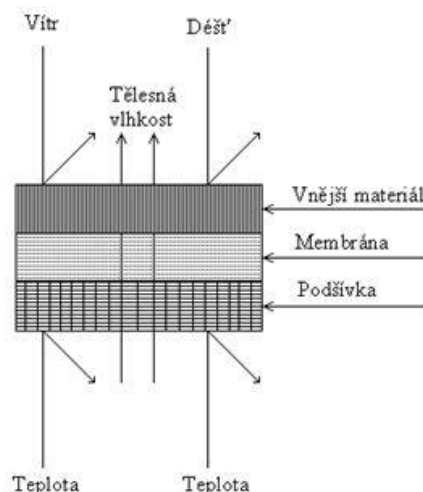
Obr. 22: Schéma dvou a půlvrstvého laminátu

5.5.4 Třívrstvý laminát

Laminace vrchní látky, membrány a podšívky je nejběžnější, neboť odpadají potíže, které jsou u dvouvrstvého laminátu. Membrána je velmi dobře chráněná před nečistotami a třením. Někteří výrobci v tomto případě dosahují i dobrých hodnot v paropropustnosti. Navíc není problém vyrobit outdoorovou bundu s váhou menší jak 500 g s výškou vodního sloupce vyšší jak 20 000 mm a s paropropustností Ret pod 3 Pa.m²/W. Na obr. 23 můžeme vidět řez třívrstvým laminátem.



a)

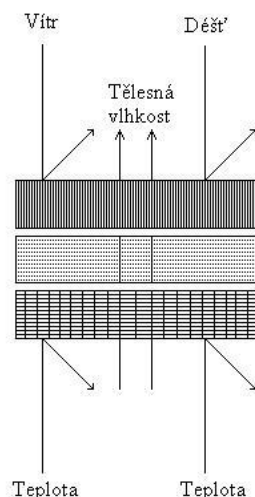


b)

Obr. 23: a) Řez tří - vrstvým laminátem, b) Schéma tří - vrstvého laminátu

5.5.5 Volně vložená membrána (Z-liner)

Dalším způsobem použití membrány v oděvu je použití tzv. volně vložené membrány nebo také Z-liner viz. obr. 24. Nepoužívá se vůbec laminace. Membrána je pouze volně vložena mezi podšívku a svrchní materiál. Z-liner se využívá u rukavic, kde laminace není příliš žádoucí z hlediska ohybové tuhosti.



Obr. 24: Schéma volně vložené membrány mezi textilní materiál (Z liner)

Aby mohl vzniknout již zmiňovaný laminát, je zapotřebí proces, který je označován jako laminace.

Laminace zahrnuje dva procesy a to:

- Nánosování
- Podlepování

5.6 Nánosování

Nánosování spočívá v nanesení a upevnění vrstvy pojiva na základní textilii. Musí být sladěna hmotnost a struktura nosné textilie s množstvím a velikostí bodů nanášeného pojiva, aby se dosáhlo co nejlepších vlastností laminátu, jako např. měkký omak, dobrá trvalá přilnavost a snížení rizika průniku pojiva.

Nanesená vrstva pojiva může být buď spojitá jako na obr. 25, nebo nespojitá. Při výrobě laminátu se většinou používá nespojitá vrstva, tím se dosáhne nízké tuhosti, měkkého omaku a dobré paropropustnosti.



Obr. 25: Znázornění nanesené pojivé vrstvy spojitě [67]

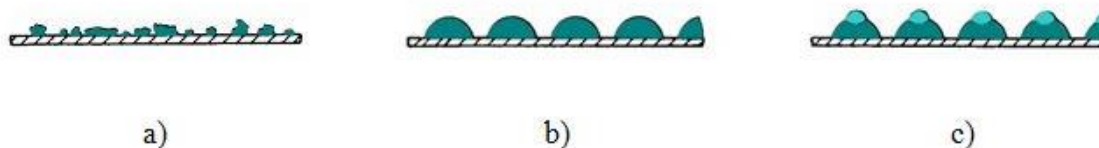
K vytvoření nespojité vrstvy se používají tyto principy:

nánosování posypem – nepravidelné rozmístění pojiva (obr. 26 a),

nánosování tiskem – pravidelně uspořádané rozmístění pojiva (obr. 26 b),

nánosování tiskem a posypem - bikomponentní bod (obr. 26 c),

nánosování z taveniny – Hotmelt.



Obr. 26: Nánosování a) posypem, b) tiskem, c) bikomponentní bod [67]

Bikomponentní, neboli dvousložkové nánosování využívá možnosti rozdílných vlastností dvou odlišných polymerů použitých pro vrchní a spodní částí bodu pojiva. Odstraňují se tím některé negativní vlastnosti, především průnik pojiva materiálem a současně se snižují náklady na výrobu. Technicky nejlepším řešením je natisknout pastový základ na textilií a nanést práškové pojivo na již vytvořený základ. Před sušením a tavením se přebytečný prášek buď odsaje pomocí elektrostatického pole, nebo odsype převrácením textilie [65].

Nánosování posypem

Při tomto způsobu nánosování se práškové pojivo rozmisťuje přímo na textilií. Pojivo je umístěno v násypce, je vynášeno dávkovacím válcem, z něhož je prášek vymetán rotačním kartáčem a rovnoměrně rozprostírán za pomoci stabilního, nebo vibrujícího síta na povrch textilie, která se pohybuje. Takto upravená textilie s pojivem prochází natavovacím polem, kdy při teplotách o 25-30 °C a vyšších, než je teplota tání pojiva za pomoci infračerveného ohřevu, dochází k upevnění pojiva na povrch textilie. Velikost částic pojiva se volí tak, aby jeho částice nezapadly do struktury tkaniny, ale zůstaly na jejím povrchu [68].

Nánosování tiskem

Pro nánosování tiskem se užívají dva technologické postupy, a sice práškový bodový způsob a pastový způsob. Na základní textilií se v bodech nanášejí aglomerované útvary pojiva (velikost a tvar aglomerovaných útvarů není závislý na velikosti částic prášku).

Rozeznáváme dva druhy práškového bodového nánosování – sítotiskový způsob a hlubotiskový. Nejčastěji používané tvary aglomerovaných útvarů jsou body - kulové vrchlíky,

ale mohou být i úsečky, či mřížky apod. Bodové nánosy bývají uspořádány do pravidelných rastrů, výjimkou je rozmístění nepravidelné při zachování rovnoměrné hustoty (Computer Punkt). Množství nánosu pojiva určuje velikost a vzájemná vzdálenost bodů, jejich rozmístění ovlivňuje omak. Mesh nám udává počet bodů vyskytujících se na uhlopříčce čtverce o straně jednoho anglického palce (asi 2,54 cm) [68].

Sítotiskový způsob

Nánosování sítotiskovým způsobem se používá většinou pro netkané textilie, které nesnesou vzhledem ke svému složení (sráží se, natavují se nebo ťloustnou) styk s vyhřátými válci hlubotiskových nánosovacích strojů [69].

Během tohoto postupu základní textilie prochází pod válcovou síťovou tiskací šablonou. Do středu této šablony je šnekovým dopravníkem dopravován prášek, který dvojitá stěrka protlačuje do otvoru v síti a tiskne tak prášek ve formě kupiček na podklad. Natavovací pole, kterým textilie dále prochází, roztaví práškovou kupičku a materiál vytvoří homogenní útvar, který je natavením upevněn na textili. Proces upevnění pojiva je ukončen ochlazením [66].

Proces - hlubotiskový způsob

Základní textilie je ohřátá díky vyhříváním ocelovým válcům, které jsou vytápěny na teploty v rozmezí 90 – 200 °C (nejčastěji kapalným médiem). Společně s tkaninou jsou tyto válce tlačeny proti horkému tiskacímu válci s teplotou 30 – 60 °C, který je opatřen gravurou. Stěrka stírá povrch tiskacího válce nahladko, a díky tomu je nanášeno přesně vymezené množství prášku. Při styku ohřáté nosné textilie s povrchem tiskacího válce dojde k přenesení aglomerovaných útvarů z gravury válce na textili obr. 27. Následuje natavení a upevnění těchto kupiček prášku v infračerveném poli, a tím vzniknou body upevněné na nosné textili [64]. Jeden z těchto způsobů podlepování byl použit pro experiment této práce, proto je níže uvedena kapitola Aplikace, včetně schématu použitého podlepovacího stroje.



Obr. 27: Zařízení pro nánosování tiskem [67]

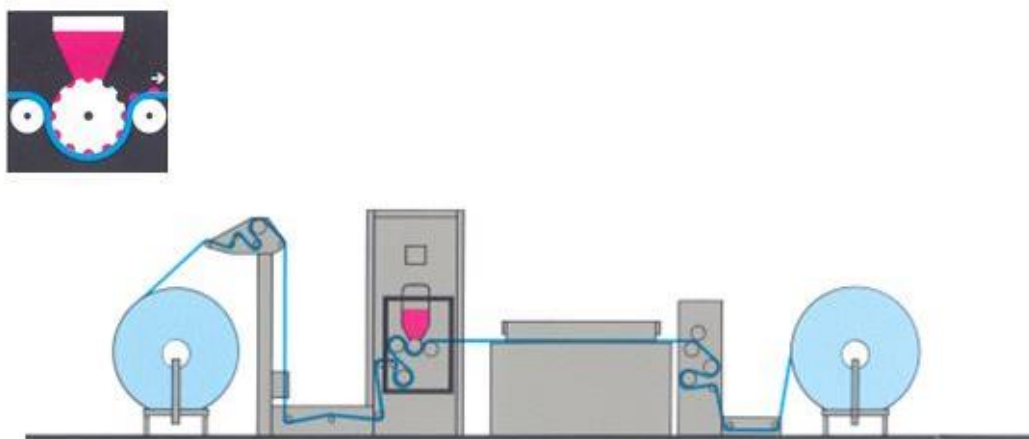
Aplikace

Práškové pojivo o velikosti částic mezi 80 – 200 μm je preferováno pro gravury tiskacích válců s hustotou 11 – 17 mesh. Gravury tiskacího válce s mesh 25 – 40 vyžadují prášky s jemnějším zrnkovým podílem, respektive 0 – 80 μm a 0 – 120 μm .

Proces práškového bodového nánosování se užívá především k nánosování takových materiálů, které nejsou citlivé na teplotní stres, jako jsou např. materiály vyrobené z přírodních a některých syntetických vláken.

Tento proces je využíván v oděvním a obuvnickém průmyslu. Výhody tohoto procesu spočívají v měkkém omaku stejnoměrnosti nanášeného množství na základní textilií a též dobře kontrolovatelný způsob nánosování [70].

Stroj firmy Villars AG na obr. 28 má zařazeno ještě kalandrování, které pomáhá zlepšit omak nánosované vložky.



Obr. 28: Schéma nánosovacího stroje – firma Villars [70]

Hot Melt (nánosování z taveniny)

Metoda Hot Melt se užívá pro nánosování a laminování, kdy je využit přímo granulát teromopastického polymeru. Takto získaná tavenina se nánosuje vytlačovacím válcem do šablony rotačního tiskacího stroje, nebo jako fólie do gravury válcového nánosovacího stroje. Množství taveniny se upravuje podle její hustoty a viskozity. Po nanesení na textilií již následuje ochlazení a ukončení procesu. Ekonomicky je tento způsob nánosování výhodnější, vzhledem k úspoře elektrické energie (odpadá sušení) a další úspoře v podobě úprav polymerních pojiv (mletí, přesívání) a lepšímu skladování, které je prostorově úspornější. Současně je šetrnější k životnímu prostředí [35].

5.7 Podlepování

K podlepování jednotlivých oděvních podlepovacích vložek se používají speciální podlepovací stroje. Podlepovací stroj (lis) je zařízení provádějící spojení, v našem případě vrchového materiálu s podšívkou, a mezi těmito materiály je ještě vložena membrána za vzniku nerozebíratelného spoje. Podlepovací stroj je zařízení, které musí též vytvořit optimální podmínky vlastního podlepení a zajistit jejich přesnou reprodukovatelnost. Musí být technicky řešen a vybaven tak, aby byla možná přesná regulace parametrů podlepování (teploty, tlaku a času) [70].

Základní požadavky kladené na podlepovací stroje

- regulovatelnost podlepovacích parametrů:
 - teplota (termostat)
 - tlak (redukční ventil)
 - čas (časový spínač)
- rovnoměrné rozložení teploty a tlaku na podlepovacím stroji
- elektrické vyhřívání čelistí (tvarovek), ploché čelisti (příp. tvarované čelisti - tvarovky)
- vybavení senzory tepelných poruch, aby se znemožnilo podlepování při jiné než požadované teplotě
- automatické čištění podlepovacích transportních pásů nebo horních tvarovek od ulpívajících částíček termoplastického pojiva a zbytků textilií [70].

Podlepovací stroje rozdělujeme obecně na:

- diskontinuální
- kontinuální
- ostatní

Dále bude věnována pozornost pouze diskontinuálním strojům a strojům kombinujícím nanášení a podlepování, kterých bylo využito při experimentu v této práci.

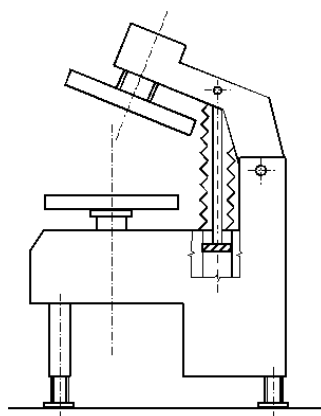
5.7.1 Diskontinuální podlepovací stroje

Jak již název napovídá, tyto stroje pracují přetržitým způsobem. Stroje mají pouze jednu pracovní polohu danou čelistmi stroje. Byly vyvinuty z žehlicích lisů. Charakteristickým pracovním znakem těchto podlepovacích strojů je, že celá oděvní součást je po vložení do

stroje vystavena současně tlaku a teplotě po celé ploše po určitou dobu. Oděvní součást je vystavena prudkému nárůstu teploty až do hodnoty stanovené pro optimální spojení, v našem případě vrchního materiálu, membrány a podšívky. Horní a dolní tělesa podlepovacího stroje při sevření materiálu zajistí, že po dobu působení teploty nedojde ke změně rozměrů materiálu. Diskontinuální podlepovací stroje se dnes uplatňují tam, kde jsou vyráběny menší série oděvů, v zakázkové výrobě či podlepování menších oděvních součástí [70]

Podlepovací stroje s kolmým přítlakem

Tyto stroje se od běžných žehlicích strojů liší především tím, že podlepovací čelist je rovinná a podlepovací parametry jsou seřiditelné podle druhu podlepovacího materiálu. Potřebný tlak se vyvolá přítlakem horního tělesa na spodní. Nevýhodou tohoto zařízení je to, že nelze dobře udržet rovnoměrný tlak po celé podlepovací ploše. Na obr. 29 můžeme vidět podlepovací stroj s kolmým přítlakem [70].

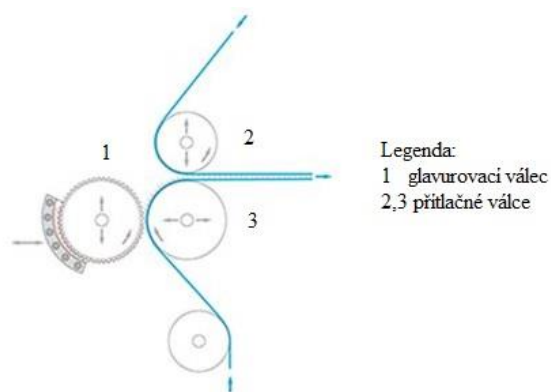


Obr. 29: Podlepovací stroj s kolmým přítlakem [70]

5.7.2 Kombinace nánosování a podlepování

Jak je patrné, k tomu, aby mohl vzniknout laminát, ať už dvou či třívrstvý, je zapotřebí, jak proces nánosování, tak i proces podlepování a jsou k tomu nutné minimálně dvě strojní zařízení. Ovšem, v dnešní době existují i metody, které dokáží tento proces skloubit do jednoho výrobního zařízení, což vede nejen ke snížení výrobních nákladů, ale též i ke zvýšení produkčních rychlostí.

Jedná se o kombinaci hlubokotiskového způsobu, který byl již popsán v kapitole 5.7, a kombinaci kontinuálního podlepovacího zařízení. Na obr. 30 je znázorněno schéma popisovaného stroje.



Obr. 30: Laminovací a podlepovací stroj [71]

Ze spodní části stroje je přiváděna textilie, která přichází do styku s glávurovacím válcem 1, který přenáší body pojiva na textili. Z horní části stroje je přiváděna další textilie. Mezi válci 2 a 3 je přiváděna textilie opatřená aglomery pojiva a dochází ke styku s textilií, která byla přiváděna z horní části stroje bez laminačních bodů. Válec 2 a 3 plní funkci podlepovací, tudíž je možné nastavit tlak a teplotu, avšak rychlost musí být jak při nanášení, tak podlepování stejná, jelikož se jedná o kontinuální zařízení. Obecně se rychlost volí podle potřeby podlepování.

Tento způsob výroby, jak již bylo napsáno, má řadu svých výhod, avšak je vhodný pouze pro větší náviny, tedy pro lamináty, které mohou sloužit jako membrána v oblečení. Tyto stroje nejsou příliš vhodné pro oděvní účely např. k výrobě sak, resp. podlepení. Zde je výhodnější tyto procesy oddělit, jelikož výztužná vložka, např. v saku, je jen v určitých partiích, nikoliv v celém oděvu jako je tomu u membránového oblečení [71].

V kapitole 5.5 byly již uvedeny některé příklady laminace nanovlákněných vrstev. V této kapitole se jedná pouze o doplnění poznatků v oblasti laminace nanovlákněných vrstev a laminaci membrán jako takových.

5.8 Rešerše aktuálního stavu laminace nanovlákněných vrstev

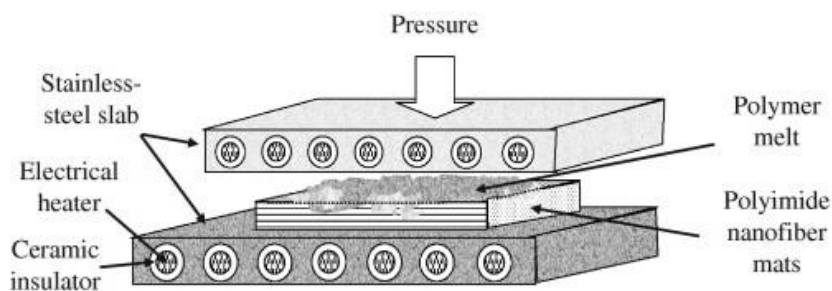
Liu se zabýval laminací nanovláken mezi tkaniny vyrobené ze skleněných vláken. Jako výchozí polymer pro výrobu nanovláken byl použit PA6 s kyselinou mravenčí a trifluethanolu a TPU s DMF. Bylo využito elektrostatického zvláknování za pomoci trysky. Vzdálenost trysky od kolektoru se pohybovala od 8 do 12 cm při napětí od 23 do 29 kV. Pro spojení nanovláken s tkaninou byla využita matrice (epoxid) 61 spolu s vytvrzovacím činidlem – triethylentetraminem v poměru 10:1 hmotnosti. Následně byl takto připravený laminát sevřen mezi dvě čelisti a umístěn do pece po dobu dvou hodin při teplotě 120°C. Cílem práce měl být

kompozit s lepšími tahovými a pevnostními vlastnostmi. Ovšem, výsledek ukázal, že nanovlákná neměla prakticky žádný vliv na již zmiňované vlastnosti [72].

Boram Yoon se zabýval laminací polyuretanových nanovláknenných vrstev. Polyuretan byl smíchán s DMF o koncentraci 13%. Výroba nanovláknenné vrstvy proběhla pomocí elektrospinningu pomocí trysek. Plošná hmotnost nanovláknenných vrstev byla 5,6 a 10,2 g/m². Takto vzniklá nanovláknenná vrstva byla slaminována s tkaninou ze 100% PA o plošné hmotnosti 88,4 g/m². Jako adhezivum byl použit polyuretan. Byly vytvářeny dvou a třívrstvé lamináty. Jako podšívkový materiál byla použita pletenina z PA o plošné hmotnosti 69 g/m². Plošné hmotnosti laminátů se pohybovaly od 91 do 188 g/m². Výsledné hodnoty paropropustnosti se pohybovaly do 5 500 g/m²/24hod. a hydrostatická odolnost byla do 7 000 mm. Vzorky byly porovnávány s mikroporézní membránou z PTFE, která dosáhla lepších hodnot jak v paropropustnosti, tak i hydrostatické odolnosti [78].

Faccini se zabýval vývojem ochranného oblečení z nanovláknenné vrstvy. Nanovláknenná vrstva byla vyrobena elektrospinningem a jako výchozí polymer byl použit PA6. Takto vzniklá nanovláknenná vrstva se laminovala s netkanou textilií z viskózy o plošné hmotnosti 28 g/m². Jako adhezivum byl použit kopolyamid. Laminace proběhla při teplotě 110°C po dobu 5s [79].

Chen se zabýval zpevněním nanovláknenných vrstev, které položil na film z PA6 a došlo k zahřátí na teplotu 270 °C, viz. obr. 31, kdy došlo k tání PA6 a proniknutí polymeru do struktury nanovláknenných vrstev [80].



Obr. 31: Zpevnění nanovláknenné vrstvy z PI a filmu z PA6 [80]

Munzarová publikovala komerční produkci, bariérových textilií pro ložní prádlo, chránící proti roztočům a dalším bakteriím. Tento produkt je založený na nanovláknenné vrstvě vyrobené na výrobním zařízení Nanospider, plošná hmotnost nanovláknenné vrstvy není vyšší jak 1 g/m². Tato vrstva byla slaminována mezi dvě nanovláknenné textilie typu spunbond [81].

Další autor zabývající se laminováním nanovláknenných vrstev je Haghi, který se zaměřil na sledování změn nanovláknenných vrstev při laminování. Výsledky pod optickým

mikroskopem ukázaly, že s rostoucí teplotou klesá propustnost pro vzduch, ale zvyšuje se adheze mezi nanovláknennou vrstvou a podkladem. Avšak snímky také ukázaly, že pokud je teplota vyšší jak teplota tání lepidla, dochází k poškození nanovláknenné vrstvy [82].

6 Analýza výroby nanovláknenné membrány

Pro tvorbu výsledné textilie je zapotřebí při experimentu postupovat ve třech základních krocích, které byly zmíněny již výše.



Obr. 32: Schéma popisu tří základních kroků experimentu

Experimentální část je řazena podle schématu na obr. 32. Experiment začíná výrobou nanovláknenné vrstvy, následuje kapitola hydrofobizace nanovláknenné vrstvy, aby bylo docíleno vysoké hydrostatické odolnosti. Jako poslední kapitolou je laminace hydrofobizované nanovláknenné vrstvy. Na začátku experimentální části je popsán postup měření a vyhodnocení především komfortních vlastností jako paropropustnost, prodyšnost a hydrostatická odolnost.

Zároveň experimentální část je rozdělena na popis laboratorní a průmyslové výroby. Veškeré vzorky byly nejdříve připraveny v laboratořích Technické univerzity v Liberci na Fakultě textilní. Po úspěšném vytvoření a otestování laboratorních vzorků se vzorky vyráběly na průmyslových strojích. Cílem bylo celý experiment, resp. výrobu nanovláknenné membrány odladit na průmyslových strojích, a to včetně otestování a vyhodnocení vzorků.

6.1 Popis použitých metod pro vyhodnocení komfortních vlastností

6.1.1 Zjišťování paropropustnosti

Paropropustnost a její měření přístrojem permetest již byly popsány v teoretické části. Tato kapitola se bude věnovat již samotnému průběhu měření. Jak už bylo zmíněno, paropropustnosti je poslední době věnována značná pozornost a je to údaj stejně důležitý, jako například výška vodního sloupce, či větruodolnost.

Měření na přístroji Permetest je v tomto pořadí, obr. 33:

- kalibrace samotného přístroje
- změření referenčního vzorku (musíme dosáhnout hodnoty $Ret\ 4,62\ Pa \cdot m^2 \cdot W^{-1}$)
- samotné měření vzorku

Měření probíhá tak, že se vzorek přiloží na měřicí hlavici, která je opatřena porézní vrstvou (membránou). Při měření se musí dávat pozor, aby porézní vrstva nebyla poškozena, samotný vzorek musí být pevně připevněn mezi hlavou a samotným tělem přístroje. Na vzorku nesmí být ohyb či vzduchová bublina, která by významně ovlivnila měření. Po relativně krátkém čase se na monitoru počítače, který je propojen s Permetestem, objeví jako výstupní hodnota výparný odpor pro vodní páry $Ret\ [Pa \cdot m^2 \cdot W^{-1}]$.



Obr. 33: Přístroj Permetest

6.1.2 Zjišťování prodyšnosti

Prodyšnost je definována jako rychlost proudu vzduchu kolmo procházejícího plochou skutečného vzorku při stanovení tlakového spádu a času [2].

Měření prodyšnosti probíhalo na přístroji švýcarské firmy TEXTEST AG, obr. 34. Princip měření spočívá ve vytvoření tlakového rozdílu mezi oběma povrchy testované textilie a měření takto vyvolaného průtoku vzduchu. Měření probíhalo při tlakovém spádu 100 Pa. Testovací plocha činila $100\ cm^2$. Propustnost byla vyjádřena mm/s. Měření probíhalo dle normy EN 9237.



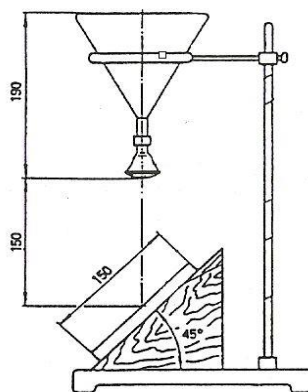
Obr. 34: Přístroj TEXTEST AG 3300

6.1.3 Stanovení odolnosti proti pronikání vody – hydrostatická odolnost

Podstatou této zkoušky je zjištění, zda nanovlákněné membrány jsou schopné odolat tlakovému působení vody. Měření bylo prováděno podle normy ČSN EN 20811. Před samotnou zkouškou byly vzorky klimatizovány po dobu 24 hod. při relativní vlhkosti $65 \% \pm 2 \%$ a teplotě $19 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \%$. Na vzorek působil tlak vody zespodu. Zkušební plocha vzorku byla 17 cm^2 . Rychlost zvyšování tlaku vody byla 60 cm vodního sloupce za minutu. U samotných nanovlákněných membrán byla hydrostatická odolnost měřena pomocí přiložené mřížky na jejich povrch. Samotné nanovlákněné membrány, ale i ostatní membrány mají malou mechanickou odolnost, aby vydržely působení vysokého tlaku, a proto se na membránu přiloží mřížka, která odolá vysokému tlaku, avšak neovlivňuje výsledek samotné hydrostatické odolnosti měřeného materiálu.

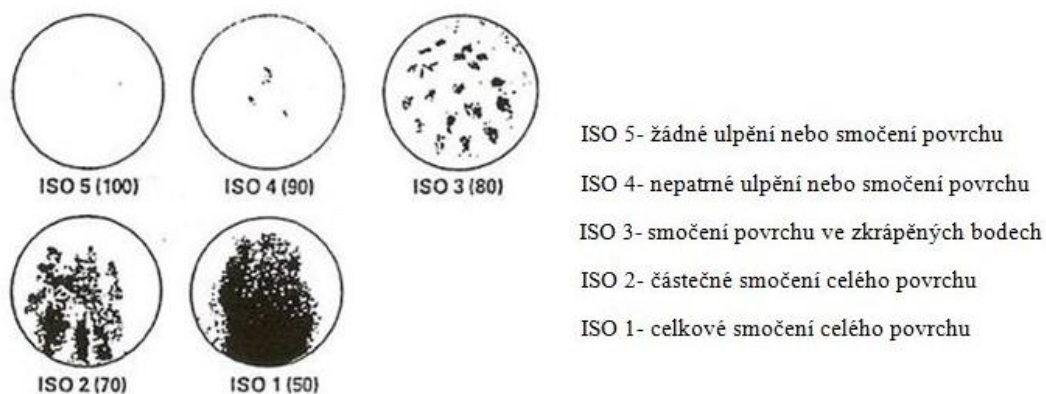
6.1.4 Zjišťování hydrofobity - Spray test

Principem metody měření Spray testu, obr. 35, je stanovení hydrofobity plošné textilie skrápěním umělým deštěm za definovaných podmínek. Zkouška je založena na tom, že se vzorek umístí do kruhového držáku skloněného v úhlu 45° lící stranou nahoru a zkrápí se 250 ml destilované vody z konstantní výšky. Voda protéká nálevkou se sprchových nástavcem.



Obr. 35: Schéma přístroje spray test

Po ukončení skrápění, které je nepřerušované, se vzorek vyjme a lící stranou se otočí dolů a silně se dvakrát udeří rámečkem o tvrdý předmět, aby se odstranily kapky ulpělé na vzorku. Hydrofobita se určuje podle etalonu, obr. 36.

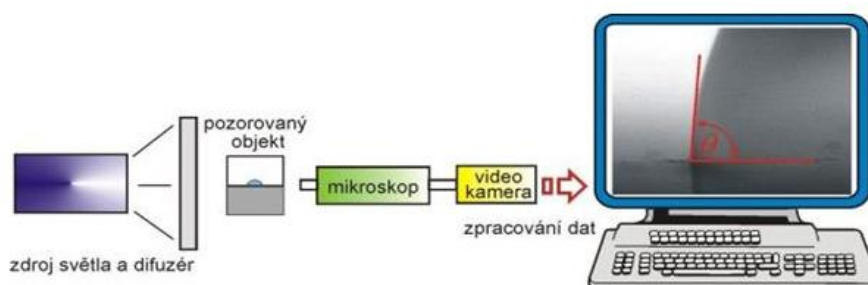


Obr. 36: Porovnávací stupnice hydrofobity podle etalonu

6.1.5 Stanovení úhlu smáčení

Úhel smáčení je přímo měřitelná vlastnost fázového rozhraní: pevná látka/kapalina/plyn. Úhel smáčení může být stanoven přímým goniometrickým měřením nebo nepřímými tenziometrickými metodami, popř. metodami založenými na geometrické analýze tvaru menisku [22].

Při měření úhlu smáčení pro zpracování experimentů disertační práce byla zvolena metoda, kdy byl vzorek umístěn na kovové destičce a snímán pomocí mikroskopu s videokamerou do počítače. Na vzorek byla pomocí mikropipety nanесena kapka vody o velikosti 10 μl . Softwarový systém pro vyhodnocení experimentu byl zvolen LUCIA G pro analýzu obrazu. Systém umožňuje komunikaci mezi snímacím zařízením (kamerou), snímací kartou a počítačem [23]. Při použití videokamery pro snímání obrazu kapky a počítače pro jeho digitalizaci a vyhodnocení se přesnost zvyšuje a stanovení úhlu smáčení je s přesností okolo 1°. Na obr. 37 je znázorněno schéma měření úhlu smáčení.



Obr. 37: Schéma uspořádání při měření úhlu smáčení [23]

6.1.6 Odolnost vůči opakovanému praní

Experimentální vzorky byly prané v automatické pračce Miele PROFESSIONAL. Postupovalo se podle normy ISO 6330:2012. Jako prací prostředek byl zvolen výrobek

Sportwash určený pro membránové oblečení. Teplota praní byla 30 °C a následovala dvě máchání při 800ot/min.

6.1.7 Statistické vyhodnocení dat

Vývoj laminátu s nanovláknennou vrstvou, který je vhodný pro oděvní účely především outdoorové aktivity, je založen na experimentálním vývoji. Při následném statistickém zpracování dat byly použity tyto statistické metody:

Test parametru μ

Byla testována nulová hypotéza $H_0: \mu = \mu_0$ oproti alternativní hypotéze $H_1: \mu \neq \mu_0$ [73, 74, 75]. Tento test byl použit např. pro ověření, zda vyrobená nanovláknenná vrstva dosahuje předepsané plošné hmotnosti.

Test shody středních hodnot

V tomto případě má nulová hypotéza tvar $H_0: \mu_1 = \mu_2$ a alternativní hypotéza $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ [73, 74, 75]. Tento test byl např. používán u porovnávání prodyšností, kde byl porovnáván vliv použité vláknenné suroviny (polyuretan, polyamid 6).

Jednofaktorová analýza rozptylu

Jednofaktorová analýza rozptylu byla použita v případech, kdy byl sledován vliv jednoho faktoru (obecně A) na více než dvou úrovních, např. vliv koncentrace impregnačního roztoku na prodyšnost nebo paropropustnost atd. Nulová hypotéza je $H_0: \alpha_i=0$, tj. efekty nemají vliv na alternativní H_1 : „ne všechny α_i jsou nulové“, tj vliv efektů lze považovat za významný [74,75].

Dvoufaktorová analýza rozptylu

Dvoufaktorová analýza rozptylu byla použita v situacích, kdy bylo nutné sledovat současně vliv dvou faktorů (obecně A, B), např. vliv plošné hmotnosti a použitého materiálu na prodyšnost atd. Nulové hypotézy jsou $H_0: \alpha_i=0, \beta_i=0$, popř. „ $\tau_i=0$ “, kde τ_i představuje interakci faktorů A a B. [74] a příslušné alternativní hypotézy jsou H_1 : „ne všechny α_i jsou nulové“, „ne všechny β_i jsou nulové“, a „ne všechny τ_i jsou nulové“ [75].

Všechny závěry plynoucí z výsledků testů byly realizovány na hladině významnosti $\alpha=0,05$. Vzhledem k tomu, že u jednotlivých experimentů bylo prováděno maximálně 5

měření, nebylo ověřováno, zda data pocházejí z normálního rozdělení, ale vycházelo se z předpokladu, že tomu tak je.

Pro výpočty byl použit statistický software QCExpert verze 2.5. V případě, že vypočtená pravděpodobnost p nedosáhla hodnoty 0,05, byla přijata alternativní hypotéza H_1 .

6.2 Výroba nanovláknenné vrstvy

Aby mohla vzniknout nanovláknenná vrstva, je nezbytné připravit polymerní roztok pro zvláknování. Nejdříve se pracovalo s roztokem PU, který se dle rešeršní části nejvíce používá nejen v oblasti výroby nanovláknenné membrány pro oděvní účely, ale též ho hojně využívají průmysloví výrobci membrán, a to především hydrofilních. Výhoda PU je jeho tažnost, která je velmi žádoucí v oblasti membrán pro oděvní účely. Avšak jeho velkou nevýhodou je, že se mísí s DMF a tato látka je zdraví škodlivá. Při aplikaci PU v průmyslové lince Nanospideru se ukázala velmi nízká produkční rychlost, ale též i vysoká hydrofobita samotného polymeru a na základě právě nízké produkční rychlosti a především vysoké hydrofobity došlo k záměně polymeru za PA6 (bude více vysvětleno v kapitole Hydrofobizace nanovláknenných vrstev), který má oproti PU na průmyslové lince typu Nanospider dvounásobnou produkční rychlost, ale i nižší hydrofobitu, která je nezbytná pro další úpravy nanovláknenné vrstvy. Kromě zmíněného Nanospideru se nanovláknenné vrstvy vyráběly i na průmyslových linkách SpinLine, které využívají tryskové zvláknovací zařízení na bázi elektrospiningu a zařízení od firmy Fiberio, které oproti zmíněným strojním zařízením využívá odstředivé zvláknování.

6.2.1 Polymerní roztok PU

Polymerní roztok pro výrobu polyuretanových nanovláknenných membrán byl připraven rozmícháním 115 g Larithane LS 14086 v roztoku, který obsahoval 50 g dimethylformamidu (DMF), 55 g nasyceného roztoku soli (TEAB) v DMF a 5 g destilované vody. Takto připravený polymerní roztok bylo nutné promíchat pomocí elektricky poháněné míchačky.

Larithane

Larithane je produkt italské firmy Novatex. Jedná se o polyuretan s vysokou polaritou. Je rozpustný v DMF (Dimethylformamid), etanolu, ale také v esterech a ketonech. Je alifatický elastomer na bázi diolu (lineární polykarbonát 200 g/mol) a diisokyanátu.

N,N – dimethylformamid

N,N-dimethylformamid je bezbarvá až lehce nažloutlá kapalina jemného čpavkového zápachu, mísitelná s vodou a organickými rozpouštědly. Jeho páry jsou těžší než vzduch, pH 0,5 mol. roztoku ve vodě 6,7, je to hořlavina, bod vzplanutí je 67 °C. Dále je to pomalu se odpařující rozpouštědlo, dráždí sliznice, spojivky a kůži zejména v tekutém stavu (zařazen mezi žíraviny). Působí lehce narkoticky.

6.2.2 Polymerní roztok PA 6

Polymerní roztok pro výrobu polyamidových nanovláknenných membrán byl připraven rozmícháním 10% roztoku polyamidu 9T ve směsi 56 % kyseliny octové a 34 % kyseliny mravenčí. Takto připravený polymerní roztok bylo nutné promíchat pomocí elektricky poháněné míchačky asi po dobu 3 minut.

Polyamid 9T

Polyamid 9T je produkt německého koncernu BASF s dlouhým alifatickým řetězcem, který se skládá z 9 methylenových skupin. Jeho výhody jsou dobrá tepelná stálost a nižší absorpce vody.

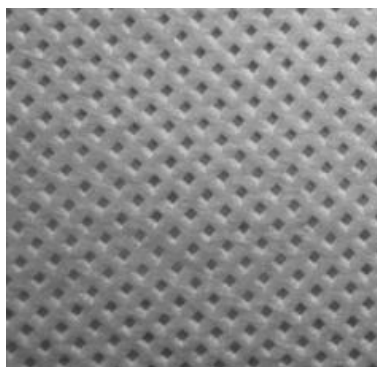
6.3 Podkladová textilie

Při tvorbě experimentu se používaly různé typy podkladů:

a) Spunbondový proplet od firmy Pegas, obr. 38

Výhoda: nízká cena

Nevýhoda: nízká teplota tání, nerovnoměrný povrch



Obr. 38: Struktura netkané textilie Spunbond s plošnou hmotností 18 g/m²

b) Vrchní tkanina s laminačními body

Výhoda: není potřeba podkladová textilie, snížení nákladů

Nevýhoda: každá textilie se jinak chová v elektrostatickém poli, a tudíž je nutné pro každou tkaninu hledat optimální podmínky, a jelikož cílem je laminovat na co nejširší spektrum tkanin není možné používat přímo samotnou tkaninu.

c) Pečící papír

Výhoda: rovnoměrný povrch

Nevýhoda: problémy při navíjení a odvíjení, kvůli sorpci vlhkosti není možné použít v nízkotlaké plazmě

d) Netkaná textilie typu Spunlace od firmy DuPont, obr. 39

Výhoda: stejnoměrný povrch, možno vyžít v nízkotlaké plazmě, jelikož se jedná o 100% PL

Nevýhoda: vysoká cena



Obr. 39: Struktura netkané textilie Spunlace od firmy Dupond

Jak je patrné z vyjmenovaných výhod a nevýhod jednotlivých podkladů, je nutné najít takový materiál, který má nízkou navlhavost pro použití v nízkotlaké plazmě. Jak bude totiž později uvedeno, právě nízkovakuová plazma je nejlepší metodou ke zvýšení hydrofobity nanovlákněné vrstvy. Dále podkladový materiál musí mít dostatečnou teplotu tání, aby nedošlo k poškození během laminace, a měl by mít dobré vlastnosti během zvláknování a v neposlední řadě příznivou cenu.

Vzhledem k výše vyjmenovaným skutečnostem byla vybrána netkaná textilie typu spunlace s obchodním označením Zontara. Vzhledem k vysoké ceně se tento materiál po laminaci znovu použije pro zvláknování. Takto byl materiál testován třikrát, aniž by bylo zaznamenáno nějaké zhoršení jak při zvláknování, tak při hydrofobizaci či laminaci.

6.4 Výroba nanovláknenných membrán

Laboratorní výroba nanovláknenných membrán byla provedena na laboratorním zařízení Nanospider. Jako zvlákňovací roztok byl použit PU a PA6. Do vaničky, ve které byl zvlákňovací váleček, se přidal připravený polymerní roztok. Rostok byl vystaven elektrickému poli o napětí $U = 76,1$ kV. Nad vaničkou byl umístěn kondenzátor ve vzdálenosti 130 mm. Rychlost nosné podkladové textilie byla nastavena na hodnotu $v = 0,1$ m/min. Relativní vlhkost ve zvlákňovací komoře byla regulována na 21 %. Čidlo měřící hodnotu vlhkosti nebylo z důvodů utěsnění umístěno přímo v komoře, ale v trubici sloužící k přívodu vzduchu do zvlákňovacího prostoru. Otáčením válečku (váleček byl poháněn rotorem) ve vaničce docházelo k ulpívání tenké vrstvy polymerního roztoku na povrchu válečku, ze kterého byla formována nanovláknna na podkladovou textilií.

V první sérii experimentů byla plošná hmotnost 1 a 5 g/m². Nižší nebyla použita, jelikož se předpokládalo, že nebude mít již dostatečnou hydrostatickou odolnost, což se následně prokázalo řadou experimentů u úpravy fulárem, postřikem, ale i úpravou pomocí plazmy. Výsledky jsou uvedeny níže v dalších kapitolách. Naopak u vyšší plošné hmotnosti nastal problém s cenou nanovláknenné vrstvy, proto se jako hraniční plošné hmotnosti použilo 5 g/m². Pouze v jednom případě, kdy se prováděla škála plošné hmotnosti nanovláknenné vrstvy upravené plazmou, byla použita plošná hmotnost od 1 do 10 g/m².

Po úspěšném zvlákňování se výroba vzorků prováděla ve firmě Nanovia, SPUR a Kertak, které se zabývají průmyslovou výrobou nanovláknenných vrstev. První dvě zmiňované společnosti využívají elektrospinnigu, resp. firma Nanovia Nanospider a firma SPUR na lince Spin Line, kterou sama vyvinula. Poslední zmiňovaná společnost Kertak využívá k výrobě nanovláknenných vrstev odstředivé zvlákňování.

Firma Spur na své zvlákňovací lince Spin Line dodala požadované vzorky o dané plošné hmotnosti (1 a 5 g/m²) a to PU a PA6. Ovšem, již na první pohled byla zaznamenána viditelná nehomogenita nanovláknenné vrstvy jak v podélném, tak i v příčném směru. Tato nehomogenita se projevila ve formě viditelně silnějších a slabších pruhů (kolísání plošné hmotnosti). Po důsledné rešerši, ale i diskuzi s odborníky z firmy Spur, se došlo k závěru, že se jednotlivé zvlákňovací trysky, resp. pole, ovlivňují, a proto vznikají tyto viditelné pruhy, resp. kolísání plošné hmotnosti.

Nejprve byla silnější a slabší místa testována, která z nich a zda dosahují předepsané jmenovité hodnoty 1 popř. 5 g/m². Pro každý pruh a použitý materiál bylo realizováno 5 měření. Výsledky jsou uvedeny v tab. 6.

Tab. 6: Výsledky kolísání plošné hmotnosti 1

Materiál	Polyuretan				Polyamid			
Jmenovitá Plošná hm. [g /m ²]	1	1	5	5	1	1	5	5
Místo	silné	slabé	silné	slabé	silné	slabé	silné	Slabé
Průměr	0,99	0,77	5,04	3,74	1,00	0,76	4,98	3,85
95%-ní IS	0,97-1,01	0,72-0,83	4,96-5,11	3,68-3,80	0,90-1,10	0,69-0,83	4,91-5,06	3,75-3,96
P	0,115	0,00015	0,137	<0,00001	0,5	0,00032	0,288	<0,00001
Platnost hypotézy	H ₀	H ₁	H ₀	H ₁	H ₀	H ₁	H ₀	H ₁

Výsledky v tab. 6 ukazují, že v místech, která byla vizuálně označena jako silná, bylo dosaženo předepsané plošné hmotnosti. U všech míst, která byla označena jako slabá, nebylo dosaženo předepsané plošné hmotnosti. Ta byla u všech vzorků o více než 20% nižší než předepsaná jmenovitá hmotnost. Jelikož uvedená analýza prokázala, že plošná hmotnost vizuálně silnějších a slabších míst se statisticky významně liší, byl sledován následně vliv těchto míst na prodyšnost. Pro ověření shodnosti středních hodnot u prodyšnosti byly formulovány pro oba typy materiálů hypotézy H₀: $\mu_{si} = \mu_{sl}$ a H₁: $\mu_{si} \neq \mu_{sl}$. Aby mohly být testovány střední hodnoty, byly nejprve testovány rozptyly. Každý vzorek byl proměřován 5krát. Výsledky jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 7: Výsledky kolísání plošné hmotnosti 2

Materiál	Polyuretan				Polyamid			
Jmenovitá Plošná hmot. [g /m ²]	1		5		1		5	
Rozptyly	0,678	0,998	0,155	0,284	0,043	1,025	0,181	0,119
P	0,358		0,286		0,0047		0,346	
Platnost hypotézy	H ₀		H ₀		H ₁		H ₀	
Průměr	22,83	28,44	5,94	7,56	16,04	18	4,43	6,29
P	0,00001		0,00060		0,0028		0,00006	
Platnost hypotézy	H ₁		H ₁		H ₁		H ₁	

Až na jednu výjimku (polyamid, plošná hmotnost 1 g/m²) vykazovaly příslušné vzorky shodný rozptyl. Vliv plošné hmotnosti slabých a silných míst vykazuje vliv na prodyšnost.

S využitím analýzy rozptylu pro dva faktory byl sledován vliv plošné hmotnosti a použitého materiálu na prodyšnost. Pro plošnou hmotnost byly použity jmenovité hodnoty 1 a 5 g.m⁻². Na každé úrovni kombinace faktorů bylo provedeno 5 měření. Výsledky jsou v tab. 8.

Tab. 8: Výsledky kolísání plošné hmotnosti 3

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Materiál	1	1014,9	1014,9	3839,8	<0,00001
Plošná hmotnost	1	85,9	85,9	325,0	<0,00001
Interakce	1	34,9	34,9	131,9	<0,00001
Rezidua	16	4,2	0,26		
Celkem	19				

Výsledky analýzy rozptylu ukazují, že oba sledované faktory, jak použitý materiál na výrobu nanovlákněné vrstvy, tak i plošná hmotnost, mají významný vliv na prodyšnost. Nezanedbatelný vliv má i interakce těchto faktorů. Výsledky ukazují, že vyšších prodyšností dosahovaly vzorky, ve kterých byl použit pro výrobu polyuretan. Rovněž vzorky s nižší hmotností dosahovaly vyšších prodyšností.

Další vzorky byly od české firmy Kertak, která používá výrobní zařízení od společnosti Fiberio (USA), která využívá, odstředivé zvláknování. Firma Kertak dodala vzorky PA6 a PU.

Dále byly vzorky vyráběny na průmyslové lince Nanospider ve firmě Nanovia a Elmarco, která dodala vzorky nanovlákněných vrstev z polymeru PA6 a PU o plošných hmotnostech 1 a 5 g/m². Obě polymerní vrstvy byly oproti laboratorním zvlákněny ze struny. Důvodem použití nové generace Nanospideru, tedy zvláknování ze struny, je dle výrobce Elmarco pro polymery typu PU a PA6 výhodnější (homogenita nanovlákněné vrstvy, rychlost zvláknění).

Výsledné hodnoty nanovlákněných vrstev z Nanospideru a Fiberio, jsou zaznamenány v tab. 9 a 10. Měření bylo provedeno pouze na nanovlákněných vrstvách vyrobených na průmyslových výrobních zařízeních Nanospider a Fiberio. Nanovlákněné vrstvy z výrobního zařízení Spin Line nebyly, proměřovány vzhledem k nestejným rozměrům nanovlákněné vrstvy, co se plošné hmotnosti týká viz. tab. 6 a 7.

Z hlediska komfortu byly proměřeny tyto vlastnosti:

- Spray test (proměřen 3x)
- Kontaktní úhel (proměřen 3x)
- Prodyšnost (proměřen 5x)
- Paropropustnost (proměřen 3x)
- Výška vodního sloupce (proměřen 3x)

Tab. 9: Porovnání průmyslově vyrobených vzorků Nanovia

Výrobce	Polymer	Plošná hmotnost [g/m ²]		Spray test	Kontaktní úhel [°]	Prodyšnost [l/m ² /s]	Paropropustnost Ret [Pa.m ² .W ⁻¹]	Vodní sloupec [m]
NANOVIA (Nanospider)	PA6	1	Průměr	ISO 1	-	23,12	< 0,1	X
			Směr. odchylka			0,91		
	PA 6	5	Průměr	ISO 1	-	6,11	< 0,1	0,12
			Směr. odchylka			0,16		0,2
	PU	1	Průměr	ISO 1	86	22,8	< 0,1	X
			Směr. odchylka			0,98		
	PU	5	Průměr	ISO 1	91	6,31	< 0,1	0,19
			Směr. odchylka			0,40		2,1
Kertak (Fiberio)	PA 6	1	Průměr	ISO 1	-	11,30	0,23	X
			Směr. odchylka			0,57		0,06
	PA6	5	Průměr	ISO 1	-	3,49	0,23	0,10
			Směr. odchylka			0,42		0,06
	PU	1	Průměr	ISO 1	87	12,21	0,17	X
			Směr. odchylka			0,66		0,06
	PU	5	Průměr	ISO 1	85	3,15	0,27	0,16
			Směr. odchylka			0,25		2,3

Veškeré vzorky dosáhly na Spray testu úrovně ISO 1, tedy absolutně smáčivý materiál, protože se nepovedlo naměřit úhel smáčení a u některých vzorků ani hydrostatická odolnost,

jelikož po kontaktu s vodou došlo ke smočení vzorku. Odolnost vzorků se jmenovitou plošnou hmotností 5 g.m^{-2} vyšla 19,3 cm, což je zcela nevyhovující.

U vzorků vyrobených firmou Kertak paropropustnost dosahovala hodnot do $0,3 \text{ Pa.m}^2.\text{W}^{-1}$. Vliv obou faktorů včetně interakce nebyl prokázán (viz tab. Id, příloha č.1). Z tab. 9 je patrné, že nanovlákná vrstva vyrobená na Nanospideru firmou Nanovia má paropropustnost Ret menší jak $0,1 \text{ Pa.m}^2.\text{W}^{-1}$ (citlivost přístroje pro měření paropropustnosti je dle výrobce od Ret $0,5 \text{ Pa.m}^2.\text{W}^{-1}$, veškerá měření samotné nanovlákné membrány je pod touto hranicí), oproti nanovlákné vrstvě vyrobené na zařízení Fiberio, kde paropropustnost dosáhla až $0,3 \text{ Pa.m}^2.\text{W}^{-1}$. Tento rozdíl v paropropustnosti je dán tzv. objemností nanovlákné vrstvy, která byla vyšší o 35%.

Ani jeden ze vzorků neměl dostatečnou výšku vodního sloupce a ani dostatečnou hydrofobitu povrchu, a proto byla provedena hydrofobizace nanovlákné vrstvy, viz. další kapitola. Vzhledem k výsledkům paropropustnosti a objemnosti nanovlákné vrstvy se dále pracovalo pouze s nanovláknou vrstvou od firmy Nanovia, která využívá výrobní zařízení Nanospider.

Při analýze se postupovalo ve třech krocích:

- ověření dosažení předepsané plošné hmotnosti (tab. Ia, příloha č. 1)
- v rámci výroby nanovlákné vrstvy v jedné firmě byl sledován vliv použitého materiálu a plošné hmotnosti na prodyšnost, výparný odpor a vodní sloupec
- porovnání dosažených hodnot mezi firmami

Výsledky jsou uvedeny v příloze č. 1.

6.5 Hydrofobizace nanovlákné vrstvy

Jelikož samotná nanovlákná vrstva má velmi nízkou hydrostatickou odolnost, je nutné její odolnost navýšit. Pro navýšení hydrostatické odolnosti byly použity hydrofobizační prostředky na bázi silikonu a fluorcarbonu a různé způsoby jejich nánosu. Nánosování se provedlo:

- 1) fulárem
- 2) postřikem
- 3) nízkovakuovou plazmou

6.5.1 Nánosování hydrofobizačního prostředku pomocí fuláru

Jako první způsob zvýšení hydrofobních vlastností nevlákněné vrstvy byl použit fulár. Důvodem výběru fuláru je jeho ekonomická dostupnost a zároveň i ekonomický provoz.

Cílem experimentu bylo provést hydrofobizaci nanovlákněné membrány nanášením dvou druhů hydrofobních prostředků na bázi silikonu a fluorkarbonu pomocí naklocování vzorků nanovlákněné vrstvy v impregnačních roztocích o různé koncentraci (použity byly vždy tři různé koncentrace) po různou dobu 1 a 2 minuty.

Pro každou kombinaci hydrofobního prostředku, koncentraci roztoku a doby smáčení bylo měřeno celkem pět vlastností impregnované nanovlákněné vrstvy: prodyšnost paropropustnost, hydrostatická odolnost, Spray test a kontaktní úhel.

Pro experiment byla použita nanovlákněná vrstva vyrobená z PA 6 a PU vyrobené na výrobním zařízení Nanospider. Plošná hmotnost nanovlákněné vrstvy byla 1 a 5 g/m².

Z důvodu nízké mechanické odolnosti nanovlákněné vrstvy se pracovalo společně s podkladovým materiálem. Byly připraveny vzorky o velikosti 50 x 50 cm. Až po úpravě došlo k oddělení upravené nanovlákněné vrstvy od podkladového materiálu.

Příprava impregnačních roztoků

Impregnační roztoky byly připraveny z prostředků na dvou různých bázích - silikonové a fluorkarbonové. První typ impregnačního roztoku na bázi silikonu byl připraven z látek: silikonová emulze Lukofix T40D, dále z Lukofix katalyzátoru C 48 přidaným za účelem zesílení polysiloxanu a destilované vody.

Pro přípravu druhého typu impregnačního roztoku byl použit fluorkarbonový prostředek Nuva FDS (výrobce Clariant International Ltd). Z každého impregnačního přípravku byly pro každý přípravek připraveny vždy tři klocovací lázně o různé koncentraci. Bylo tedy potřeba připravit celkem 6 klocovacích lázní.

Pro přípravu klocovacích roztoků bylo do připravených kádinek naváženo množství chemikálií dle předpisu a doplněno 100 g destilované vody.

Roztok na bázi silikonu byl připraven dle následujícího předpisu:

Koncentrace č. 1 ("5 g"):	5g Lukofix T 40 D; 1g katalyzátor C 48; 100 g H ₂ O
Koncentrace č. 2 ("10 g"):	10g Lukofix T 40 D; 2g katalyzátor C 48; 100 g H ₂ O
Koncentrace č. 3 ("15 g"):	15g Lukofix T 40 D; 3g katalyzátor C 48; 100 g H ₂ O

Roztok na bázi fluorokarbonu byl připraven dle následujícího předpisu:

- Koncentrace č. 1 ("5 g"): 5 g Nuva FDS; 100 g H₂O
Koncentrace č. 2 ("10 g"): 10 g Nuva FDS; 100 g H₂O
Koncentrace č. 3 ("15 g"): 15 g Nuva FDS; 100 g H₂O

V dalším textu budeme pro jednotlivé koncentrace používat zjednodušeného značení "5 g", "10 g" a "15 g", dle hmotnosti hlavní složky roztoku na 100 g H₂O.

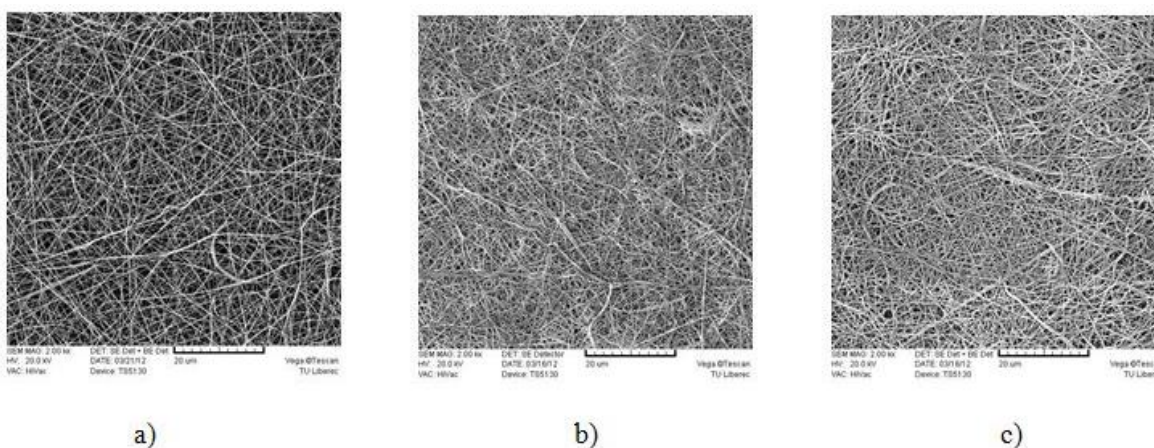
Průběh impregnování

Z kádinky byl vždy do čisté klocovací nádoby přelit roztok o daném složení a koncentraci, viz předpisy jednotlivých roztoků. Následně byl celý vzorek (včetně podkladového materiálu) ponořen do roztoku. Zde byl otáčen, aby byl smočen (naklocován) v roztoku rovnoměrně z obou stran. Rozdílně byla volena doba klocování, a to konkrétně 1 minuta a 2 minuty.

Po této aplikaci impregnace bylo provedeno odmačknutí přebytečného roztoku na fuláru za těchto podmínek:

- Tlak mezi válci 4 bary
- Rychlost otáčení válců 1 m/min

Takto upravený vzorek byl umístěn do horkovzdušné komory a při teplotě 80°C usušen. Poté byla ještě provedena kondenzace v horkovzdušné komoře při teplotě 160°C, která trvala 5 minut. Na obr. 40 jsou snímky z rastrovacího mikroskopu a porovnání vzorků před úpravou, úpravou silikonem a fluorkarbonem.



Obr. 40: a) Neupravený vzorek 5 g/m² b) Úprava silikonem b) Úprava fluorkarbonem

V tab. 10, 11 a 12 jsou shrnuty výsledky prodyšnosti, paropropustnosti a hydrostatické odolnosti pro nanovláknennou vrstvu z PA 6 a v tab. 13, 14 a 15 jsou výsledky pro nanovláknennou vrstvu z PU.

Tab. 10: Porovnání komfortních vlastností upravené nanovlákněné vrstvy PA6 o plošné hmotnosti 5 g/m²

Chem. prost.	Koncentrace [g]		Úhel smáčení	Doba smáčení [min]	Prodyšnost [l/m ² /s]	Paropropustnost Ret [Pa.m ² .W ⁻¹]	Vodní sloupec [m]		
Bez úpravy PA 5 g/m ²	-	Průměr	-	-					
		Směr. odchylka	-						
Silikon	5	Průměr	119	1	2,42	0,98	1,06		
		Směr. odchylka	-		0,04	0,030	0,03		
	10	Průměr	118		1,77	0,98	1,95		
		Směr. odchylka	-		0,019	0,040	0,04		
	15	Průměr	121		1,43	1,47	2,47		
		Směr. odchylka	-		0,032	0,041	0,02		
	5	Průměr	117		2	1,15	1,06	3,50	
		Směr. odchylka	-			0,028	0,02	0,04	
	10	Průměr	120	0,84		1,17	4,87		
		Směr. odchylka	-	0,031		0,06	0,12		
	15	Průměr	120	0,58		1,26	5,38		
		Směr. odchylka	-	0,023		0,041	0,1		
	Fluorkarbon	5	Průměr	121		1	2,95	0,46	1,72
			Směr. odchylka	-			0,052	0,036	0,02
		10	Průměr	117	2,82		0,79	5,17	
			Směr. odchylka	-	0,061		0,021	0,05	
15		Průměr	120	2,65	1,07		6,03		
		Směr. odchylka	-	0,029	0,039		0,02		
5		Průměr	123	2	1,42		0,90	9,25	
		Směr. odchylka	-		0,015		0,010	0,41	
10		Průměr	119		1,28	1,04	10,26		
		Směr. odchylka	-		0,039	0,049	0,03		
15		Průměr	121		1,22	1,16	12,94		
		Směr. odchylka	-		0,447	0,037	0,04		

K tabulce 10 viz příloha č. 2

Tab. IIa: Analýza: Vliv typu impregnace a koncentrace na prodyšnost – PA, plhm5 g/m², čas 1m

Tab. IIb: Analýza: Vliv typu impregnace a koncentrace na prodyšnost – PA, plhm5 g/m², čas 2m

Tab. IIc: Analýza: Vliv typu impregnace a koncentrace na paropropustnost – PA, plhm5 g/m², čas 1m

Tab. IId: Analýza: Vliv typu impregnace a koncentrace na paropropustnost – PA, plhm5 g/m², čas 2m

Tab. IIE: Analýza: Vliv typu impregnace a koncentrace na vodní sloupec – PA, plhm5 g/m², čas 1m

Tab. IIIf: Analýza: Vliv typu impregnace a koncentrace na vodní sloupec – PA, plhm5 g/m², čas 2m

Porovnání průměrů všech výše zmíněných analýz mezi 1 a 2 minutami nebyly provedeny mezi všemi, pouze u těch, kde bylo zvoleno kritérium – např. orientace na paropropustnost – nižší je lepší – proto jsou porovnány jenom výsledky podle koncentrací 15g.

Tab. 11: Porovnání komfortních vlastností upravené nanovlákněné vrstvy PA6 o plošné hmotnosti 1 g/m², Silikon

Chem. prost.	Koncentrace [g]		Úhel smáčení	Doba smáčení [min]	Prodyšnost [l/m ² /s]	Paropropustnost Ret [Pa.m ² .W ⁻¹]	Vodní sloupec [m]	
Bez úpravy PA 1 g/m ²	-	Průměr	-	-				
		Směr. odchylka	-					
Silikon	5	Průměr	117	1	3,98	0,84	0,20	
		Směr. odchylka	-		0,022	0,049	0,008	
	10	Průměr	119		3,17	1,04	0,27	
		Směr. odchylka	-		0,029	0,049	0,005	
	15	Průměr	121		2,50	1,20	0,31	
		Směr. odchylka	-		0,033	0,052	0,005	
	5	Průměr	123		2	3,51	0,90	0,22
		Směr. odchylka	-			0,028	0,044	0,0082
	10	Průměr	121			2,87	0,96	0,25
		Směr. odchylka	-			0,021	0,049	0,005
	15	Průměr	122			1,78	1,22	0,34
		Směr. odchylka	-			0,035	0,075	0,001

Tab. 12: Porovnání komfortních vlastností upravené nanovlákněné vrstvy PA6 o plošné hmotnosti 1 g/m², Fluorkarbon

Chem. prost.	Koncentrace [g]		Úhel smáčení	Doba smáčení [min]	Prodyšnost [l/m ² /s]	Paropropustnost Ret [Pa.m ² .W-1]	Vodní sloupec [m]	
Fluorkarbon	5	Průměr	122	1	3,63	0,51	0,20	
		Směr. odchylka	-		0,029	0,051	0,005	
	10	Průměr	118		2,87	0,88	0,29	
		Směr. odchylka	-		0,024	0,021	0,008	
	15	Průměr	119		1,94	1,12	0,32	
		Směr. odchylka	-		0,064	0,075	0,005	
	5	Průměr	123		2	3,726	0,89	0,22
		Směr. odchylka	-			0,027	0,044	0,008
	10	Průměr	121			3,30	1,06	0,25
		Směr. odchylka	-			0,021	0,049	0,0051
	15	Průměr	120			1,96	1,16	0,34
		Směr. odchylka	-			0,038	0,038	0,005

K tabulkám 11 a 12 viz příloha č. 2

Tab. IIIa: Analýza: Vliv typu impregnace a koncentrace na prodyšnost – PA, plhm1 g/m², čas 1m

Tab. IIIb: Analýza: Vliv typu impregnace a koncentrace na prodyšnost – PA plhm1 g/m², čas 2m

Tab. IIIc: Analýza: Vliv typu impregnace a koncentrace na paropropustnost – PA, plhm1 g/m², čas 1m

Tab. IIId: Analýza: Vliv typu impregnace a koncentrace na paropropustnost – PA, plhm1 g/m², čsa 2m

Tab. IIIe: Analýza: Vliv typu impregnace a koncentrace na vodní sloupec – PA, plhm1 g/m², čsa 1m

Tab. IIIf: Analýza: Vliv typu impregnace a koncentrace na vodní sloupec – PA, plhm1 g/m², čsa 2m

Porovnání průměrů všech výše zmíněných analýz mezi 1 a 2 minutami.

Tab. 13: Porovnání komfortních vlastností upravené nanovlákněné vrstvy PU o plošné hmotnosti 1 g/m²

Chem. prost.	Koncentrace [g]		Úhel smáčení	Doba smáčení [min]	Prodyšnost [l/m ² /s]	Paropropustnost Ret [Pa.m ² .W ⁻¹]	Vodní sloupec [m]			
Bez úpravy PU 1g/m ²	-	Průměr	-	-						
		Směr. odchylka	-							
Silikon	5	Průměr	121	1	3,46	0,81	0,20			
		Směr. odchylka	-		0,047	0,033	0,0008			
	10	Průměr	123		3,14	1,06	0,25			
		Směr. odchylka	-		0,118	0,102	0,02			
	15	Průměr	124		2,52	1,15	0,30			
		Směr. odchylka	-		0,025	0,013	0,012			
	5	Průměr	118		2	3,21	0,94	0,21		
		Směr. odchylka	-			0,023	0,047	0,005		
	10	Průměr	119			2,82	1,12	0,27		
		Směr. odchylka	-			0,033	0,019	0,021		
	15	Průměr	121			2,0	1,21	0,32		
		Směr. odchylka	-			0,414	0,022	0,021		
	Fluorcarbon	5	Průměr			123	1	3,95	0,44	0,20
			Směr. odchylka			-		0,043	0,001	0,005
		10	Průměr			121		2,98	0,45	0,21
			Směr. odchylka			-		0,070	0,043	0,005
15		Průměr	122	2,69		0,96		0,25		
		Směr. odchylka	-	0,019		0,045		0,005		
5		Průměr		2		3,72		0,76	0,21	
		Směr. odchylka				0,079		0,049	0,017	
10		Průměr				3,29		0,98	0,25	
		Směr. odchylka				0,095		0,075	0,005	
15		Průměr			2,23	1,06		0,28		
		Směr. odchylka			0,040	0,49		0,008		

K tabulce 13 viz příloha č. 2

Tab. IVa: Analýza: Vliv typu impregnace a koncentrace na prodyšnost – PU, plhm1 g/m², čas 1m

Tab. IVb: Analýza: Vliv typu impregnace a koncentrace na prodyšnost – PU, plhm1 g/m², čas 2m

Tab. IVc: Analýza: Vliv typu impregnace a koncentrace na paropropustnost – PU, plhm1 g/m², čas 1m

Tab. IVd: Analýza: Vliv typu impregnace a koncentrace na paropropustnost – PU, plhm1 g/m², čas 2m

Tab. IVe: Analýza: Vliv typu impregnace a koncentrace na vodní sloupec – PU, plhm1 g/m², čas 1m

Tab. IVf: Analýza: Vliv typu impregnace a koncentrace na vodní sloupec – PU, plhm1 g/m², čas 2m

Porovnání průměrů všech výše zmíněných analýz mezi 1 a 2 minutami.

Tab. 14: Porovnání komfortních vlastností upravené nanovlákněné vrstvy PU o plošné hmotnosti 5 g/m², Silikon

Chem. prost.	Koncentrace [g]	-	Úhel smáčení	Doba smáčení [min]	Prodyšnost [l/m ² /s]	Paropropustnost Ret [Pa.m ² .W ⁻¹]	Vodní sloupec [m]
Bez úpravy PU 5 g/m ²	-	Průměr	-	-			
		Směr. odchylka	-				
Silikon	5	Průměr	121	1	2,99	1,02	0,94
		Směr. odchylka	-		0,021	0,075	0,04
	10	Průměr	120		1,51	1,14	1,55
		Směr. odchylka	-		0,018	0,049	0,04
	15	Průměr	119		1,268	1,14	2,02
		Směr. odchylka	-		0,025	0,007	0,06
	5	Průměr	123	2	2,0	1,44	2,98
		Směr. odchylka	-		0,024	0,049	0,02
	10	Průměr	121		1,26	2,06	3,11
		Směr. odchylka	-		0,036	0,102	0,03
	15	Průměr	120		1,01	2,08	4,01
		Směr. odchylka	-		0,044	0,075	0,03

Tab. 15: Porovnání komfortních vlastností upravené nanovlákněné vrstvy PU o plošné hmotnosti 5 g/m², Fluorkarbon

Chem. prost.	Koncentrace [g]	-	Úhel smáčení	Doba smáčení [min]	Prodyšnost [l/m ² /s]	Paropropustnost Ret [Pa.m ² .W ⁻¹]	Vodní sloupec [m]	
Fluorkarbon	5	Průměr	123	1	3,01	0,47	1,09	
		Směr. odchylka	-		0,047	0,04	0,009	
	10	Průměr	124		2,89	0,78	2,77	
		Směr. odchylka	-		0,021	0,024	0,05	
	15	Průměr	124		1,55	1,99	3,40	
		Směr. odchylka	-		0,019	0,773	0,005	
	5	Průměr	123	2	1,578	0,96	4,50	
			Směr. odchylka		-	0,017	0,009	0,08
		10	Průměr		125	1,35	1,18	5,50
			Směr. odchylka		-	0,013	0,021	0,021
		15	Průměr		123	1,12	1,38	5,59
			Směr. odchylka		-	0,029	0,075	0,029

K tabulkám 14 a 15 viz příloha č. 2

Tab. Va: Analýza: Vliv typu impregnace a koncentrace na prodyšnost – PU, plhm5 g/m², čas 1m

Tab. Vb: Analýza: Vliv typu impregnace a koncentrace na prodyšnost – PU, plhm5 g/m², čas 2m

Tab. Vc: Analýza: Vliv typu impregnace a koncentrace na paropropustnost – PU, plhm5 g/m², čas 1m

Tab. Vd: Analýza: Vliv typu impregnace a koncentrace na paropropustnost – PU, plhm5 g/m², čsa 2m

Tab. Ve: Analýza: Vliv typu impregnace a koncentrace na vodní sloupec – PU, plhm5 g/m², čsa 1m

Tab. Vf: Analýza: Vliv typu impregnace a koncentrace na vodní sloupec – PU, plhm5 g/m², čsa 2m

Porovnání průměrů všech výše zmíněných analýz mezi 1 a 2 minutou.

Jak je z výsledků patrné, nanovlákněná vrstva vyrobená z PU dosáhla výrazně nižších hodnot hydrostatické odolnosti, než nanovlákněná vrstva z PA 6. Důvodem je, že nanovlákněná vrstva z PU měla vyšší hydrofobitu, což prokázal úhel smáčení uvedený v kapitole 5.4. Výsledky komfortních vlastností samotné nanovlákněné vrstvy, ale také mokré přivažek, který je popsán hned v další kapitole, a tudíž samotná struktura absorbovala méně hydrofobního prostředí, což mělo pravděpodobně za následek právě nižší hydrostatickou odolnost. Proto pro další experimenty byla použita nanovlákněná vrstva z PA6.

Mokrý přivažek

Kromě vlastností impregnované membrány byl zjišťován i mokrý přivažek, tj. procentuální zvýšení hmotnosti membrány po klocování. Vzhledem k výsledkům nanovlákných vrstev s plošnou hmotností 1 g/m^2 , mokré přivažky byly prováděny pouze pro nanovlákné vrstvy o plošné hmotnosti 5 g/m^2 .

Před impregnací byl celý vzorek, tedy nanovlákná vrstva spolu s podkladem (netkaná textile – Spunlace), zvážen.

Dále byl samostatně zvážen pouze podkladový materiál odpovídající stejné velikosti vzorku ($50 \times 50 \text{ cm}$). Tento podkladový materiál (bez nanovlákné vrstvy) byl poté také naklocován v impregnačním roztoku, odždímnut mezi válci fuláru a poté znovu zvážen.

Nakonec byl celý naimpregnovaný vzorek (nanovlákná vrstva a podkladový materiál) zvážen po odždímnutí vzorku fulárem.

Výpočet hmotnostního přivažku U byl proveden podle následujícího vzorce:

$$U = \frac{[m_{\text{impreg.}}(\text{Pod.} + \text{Mem.}) - m(\text{Pod.} + \text{Mem.})] - [m_{\text{impreg.}}(\text{Pod.}) - m(\text{Pod.})]}{m(\text{Pod.})} \cdot 100 \% , \quad (45)$$

kde "Pod." je zkratka pro podkladový materiál, "Mem." pro membránu, symbol $m_{\text{impreg.}}$ značí hmotnost po impregnaci a m hmotnost před impregnací. Následující tabulky shrnují vypočtené mokré přivažky pro každou kombinaci hydrofobního prostředku, koncentrace roztoku a doby máčení.

Tab. 16: Mokré přivažky na nanovlákné vrstvě, chemický prostředek - silikon

Nanovlákná vrstva	Koncentrace	Doba smočení	Mokrý přivažek [g]
PA 6	5	1	260
	10	1	320
	15	1	270
	5	2	457
	10	2	428
	15	2	401
PU	5	1	201
	10	1	190
	15	1	210
	5	2	395
	10	2	380
	15	2	359

Tab. 17: Vliv koncentrace a doby smočení na mokrý přivažek - polyamid

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Koncentrace	2	1501	750,5	0,703	0,587
Doba smočení	1	31682,67	31682,67	29,69	0,032
Interakce	1	41,31	41,31	0,0197	0,911
Rezidua	1	2093,03	2093,03		
Celkem	5	35318	7063,6		

Tab. 18: Vliv koncentrace a doby smočení na mokrý přivažek - polyuretan

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
koncentrace	2	234,33	117,17	0,377	0,725
Doba smočení	1	47348,16	47348,16	152,65	0,006
Interakce	1	219,25	219,25	0,546	0,594
Rezidua	1	401,09	401,09		
Celkem	5	48202,83			

Tab. 19: Mokré přivažky na nanovlákněné vrstvě, chemický prostředek - flourkarbon

Nanovlákněná vrstva	Koncentrace	Doba smočení	Mokrý přivažek [g]
PA 6	5	1	317
	10	1	350
	15	1	381
	5	2	555
	10	2	560
	15	2	572
PU	5	1	250
	10	1	278
	15	1	298
	5	2	478
	10	2	490
	15	2	453

Tab. 20: Vliv koncentrace a doby smočení na mokrý přivažek - polyamid

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
koncentrace	2	1642,33	821,16	2,94	0,254
Doba smočení	1	68053,5	68053,5	243,48	0,004
Interakce	1	547,21	547,21	46,42	0,093
Rezidua	1	11,79	11,79		
Celkem	5	70254,83			

Tab. 21: Vliv koncentrace a doby smočení na mokrý přivažek - polyuretan

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
koncentrace	2	1636,33	818,17	0,211	0,826
Doba smočení	1	80504,17	80504,17	20,71	0,045
Interakce	1	7665,55	7665,55	71,79	0,075
Rezidua	1	106,78	106,78		
Celkem	5	89912,83			

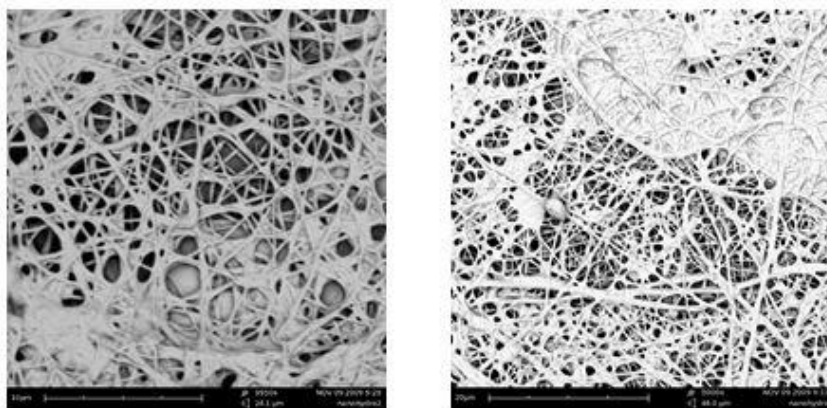
Z tab. 16 - 21 je patrné, že delší doba klocování podle očekávání způsobí vyšší mokrý přivažek (přibližně o jednu polovinu). Dále impregnační roztok na bázi fluorkarbonu dosahuje obecně o něco vyšších hmotnostních přivažků než při použití roztoku na bázi silikonu. Naopak se nezdá, že by mokrý přivažek závisel na koncentraci roztoků. Obecně jsou hodnoty přivažků poměrně vysoké: membrána zvýšila impregnační svoji hmotnost několikanásobně. Dále je patrné, že nanovlákněná vrstva z PA 6 absorbovala více hydrofobního prostředku než PU, což se projevilo na samotné hydrostatické odolnosti.

6.5.2 Zvýšení hydrofobity pomocí postříku

Stejně jako u zvyšování hydrofobity nanovlákněné vrstvy pomocí fuláru i zde byly použity stejné dva hydrofobní prostředky, a to na bázi silikonu Lukofix T 40 D a fluorkarbon Nuva FDS při zachování stejné koncentrace 5, 10 a 15 g a stejného postupu přípravy.

Byly připraveny vzorky nanovlákněné vrstvy s podkladovou textilií (netkaná textilie – Spunlace) o velikosti 50x50 cm. Nanovlákněná vrstva byla jako v předchozím případě z PA6 a PU. Do nádoby na stříkací pistoli (výrobce SATA) se umístil hydrofobizační prostředek a došlo k nánosu hydrofobizačního prostředku na nanovlákněnou vrstvu. Nanášený hydrofobizační prostředek se nanášel při tlaku 5 barů s průměrem nanášecího bodu na vrstvě polymerních nanovláken 1cm. Nanášení proběhlo kontinuálně příčným pohybem trysky. Následně se vytvořený textilní kompozit vystavil v horkovzdušné komoře po dobu 5 minut teplotě 140°C ve volném stavu.

Díky tomuto postupu došlo k zaplnění mezivlákněných pórů vrstvy polymerních nanovláken hydrofobním prostředkem v tuhém stavu. Alespoň některé z mezivlákněných pórů se uzavrou a jsou zcela neprostupné pro vodu v kapalném stavu, viz obr. 41, a zůstávají, jak bylo potvrzeno řadou testů, prostupné pro vodní páru, avšak ne tak dobře jako v případě fuláru.



Obr. 41: Upravená nanovláknenná vrstva pomocí stříkání silikonu na povrch nanovláken

Jednotlivá polymerní nanovláknna se navíc tuhým hydrofobním prostředkem fixují proti vzájemnému prokluzu. V tab. 22 a 23 jsou výsledky úpravy postříkem.

Tab. 22: Vliv použité úpravy a koncentrace na prodyšnost, paropropustnost a hydrostatickou odolnost

Chemický prostředek	Koncentrace [g]	-	Úhel smáčení [°]	Prodyšnost [l/m ² /s]	Paropropustnost Ret [Pa.m ² .W ⁻¹]	Vodní sloupec [m]
Bez úpravy PA6 5 g/m ²	-	Průměr	-			
		Směr. odchylka	-			
Silikon	5	Průměr	128	2,41	3,22	6,40
		Směr. odchylka	-	0,101	0,075	0,20
	10	Průměr	130	0,938	3,88	8,93
		Směr. odchylka	-	0,028	0,075	0,047
	15	Průměr	132	0	4,54	13
		Směr. odchylka	-	0	0,08	0,39
Fluorkarbon	5	Průměr	127	1,93	2,94	6,80
		Směr. odchylka	-	0,033	0,102	0,22
	10	Průměr	128	1,04	3,02	9,33
		Směr. odchylka	-	0,053	0,075	0,17
	15	Průměr	131	0,152	3,96	12,81
		Směr. odchylka	-	0,037	0,08	0,20

K tabulce 22 viz příloha č. 2

Tab. VIa: Vliv použité úpravy a koncentrace na prodyšnost

Tab. VIb: Vliv použité úpravy a koncentrace na paropropustnost

Tab. VIc: Vliv použité úpravy a koncentrace na vodní sloupec

Tab. 23: Vliv použité úpravy a koncentrace na prodyšnost, paropropustnost a hydrostatickou odolnost

Chemický prostředek	Koncentrace [g]	-	Úhel smáčení [°]	Prodyšnost [l/m ² /s]	Paropropustnost Ret [Pa.m ² .W ⁻¹]	Vodní sloupec [m]
Bez úpravy PA6 1 g/m ²	-	Průměr	-			
		Směr. odchylka	-			
Silikon	5	Průměr	129	0,98	0,94	0,74
		Směr. odchylka	-	0,075	0,042	0,14
	10	Průměr	131	0,35	1,42	0,80
		Směr. odchylka	-	0,0264	0,075	0,09
	15	Průměr	128	0,214	2,52	1,22
		Směr. odchylka	-	0,019	0,748	0,02
Fluorkarbon	5	Průměr	131	0,86	1,24	0,55
		Směr. odchylka	-	0,383	0,174	0,07
	10	Průměr	132	0,95	1,62	1,15
		Směr. odchylka	-	0,034	0,147	0,04
	15	Průměr	129	0,47	2,56	1,29
		Směr. odchylka	-	0,070	0,049	0,17

K tabulce 23 viz příloha č. 2

Tab. VIIa: Vliv použité úpravy a koncentrace na prodyšnost

Tab. VIIb: Vliv použité úpravy a koncentrace na paropropustnost

Tab. VIIc: Vliv použité úpravy a koncentrace na vodní sloupec

Z výsledků je patrné, že došlo k výraznému zvýšení hydrostatické odolnosti, především u nanovlákněné vrstvy s plošnou hmotností 5 g/m². Oproti úpravě pomocí fuláru je hydrostatická odolnost dvakrát větší, avšak na úkor paropropustnosti, která se výrazně zhoršila, proto ani tento způsob není příliš vhodný.

6.5.3 Zvýšení hydrofobity pomocí nízkovakuové plazmy

Poslední způsob nánosu hydrofobního prostředku pro zvýšení hydrostatické odolnosti byla nízkovakuová plazma. Důvodem volby nízkovakuové plazmy před atmosférickou je, že dle rešerše nemá atmosférická plazma takový účinek a ani není zaručena kontinuita upravovaného povrchu. Dalším důvodem je vznik monomolekulární vrstvy na povrchu

nanovláken a její propojení kovalentní vazbou, což zvyšuje odolnost při praní, ale především možnost proniknutí hydrofobního prostředku do samotné struktury nanovláken.

Byla použita nízkovakuová plazma typu roll-to-roll od belgického výrobce Europlasma. Více o plazmatické úpravě a zařízení pojednává kapitola 5.4. Při tomto způsobu nanášení se principiálně nanáší tak malé množství hydrofobního prostředku, že v podstatě nemůže dojít k zaplnění, resp. ucpání mezivláčkových pórů vrstvy polymerních nanovláken. Plazmatickým nanosením hydrofobního filmu na povrch polymerních nanovláken se zvyšuje hydrostatická odolnost celé vrstvy polymerních nanovláken, která si však současně díky volným mezivláčkovým prostorům, zachovává svoji původní výbornou paropropustnost. Užité vlastnosti takto upravené vrstvy polymerních nanovláken jsou v důsledku toho podstatně vyšší než u výše vyjmenovaných postupů. Jako hydrofobní prostředek se použil pouze fluorkarbon C6, jelikož výrobce nenabízel možnost použití silikonu. Navíc výrobce blíže nspecifikoval o jaký typ fluorkarbonu se jedná, jelikož se dle výrobce jedná o výrobní tajemství.

Podmínky v nízkovakuové plazmě:

- tlak 100 mili Torrů
- teplota od 18 °C do 150 °C
- rychlost převíjení 5 m/min

Jako podkladový materiál byla použita netkaná textilie typu Spunlace ze 100% PL. Důvodem tohoto podkladu je, že má daleko nižší navlhavost než celulóza, ze kterého je vyroben např. podkladový materiál pečící papír. Navlhavost materiálu způsobuje problémy při vytvoření vakua, které je nezbytné pro správnou funkci nízkovakuové plazmy, proto náviny určené pro plazmatickou úpravu byly navinuty na plastové dutince. Vzhledem k výsledkům z předchozích experimentů byla upravována pouze nanovláčková vrstva o plošné hmotnosti 5 g/m². V tab. 24 jsou uvedeny výsledné hodnoty a v tab. 25 je uvedeno statistické vyhodnocení měření.

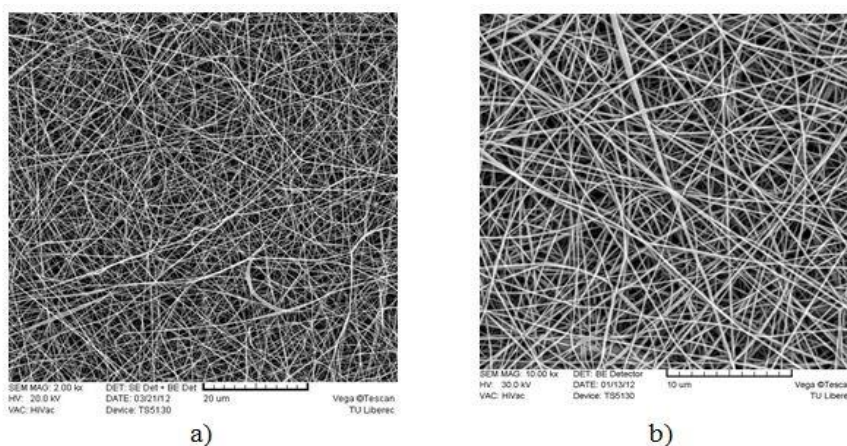
Tab. 24: Výsledné hodnoty měření

Materiál		Úhel smáčení [$^{\circ}$]	Prodyšnost [$l/m^2/s$]	Paropropustnost Ret [$Pa \cdot m^2 \cdot W^{-1}$]	Vodní sloupec [m]
Bez úpravy PA6 5g/m ²	Průměr	121	4,12	0,18	0,14
	Směr. odchylka	-	0,015	0,045	-
Upravený vzorek	Průměr	124	4,16	0,16	9,10
	Směr. odchylka	-	0,086	0,055	0,10

Tab. 25: Statistické vyhodnocení výsledků

	Prodyšnost		Paropropustnost	
	Bez úpravy	S úpravou	Bez úpravy	S úpravou
Rozptyly	0,00023	0,00748	0,002	0,003
p	0,003		0,352	
Platnost hypotézy	H ₁		H ₀	
Průměr	4,116	4,164	0,18	0,16
p	0,289		0,544	
Platnost hypotézy	H ₁		H ₀	

Jak je z výsledků patrné, byla zachována paropropustnost nanovlákněné vrstvy, včetně prodyšnosti, avšak přitom došlo k výraznému zvýšení hydrostatické odolnosti. Tento typ úpravy můžeme považovat za nejlepší a vhodný pro další vývoj v oblasti nanovlákněných membrán pro oděvní účely. Na obr. 42 je snímek z rastrovacího mikroskopu před a po úpravě, ani při větším zvětšení, není viditelná hydrofobní úprava.

**Obr. 42: a) Neupravená nanovlákněná membrána 5 g/m² b) Upravená nanovlákněná membrána**

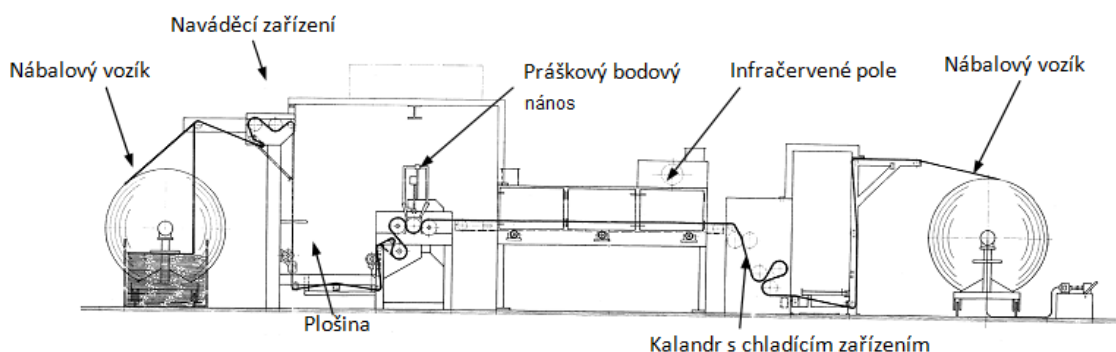
6.6 Nánosování

Po výrobě samotné nanovlákněné vrstvy nastává proces laminace. V této práci byla použita dvě různá průmyslová zařízení, a to ve firmě:

- Interlana, která používala stroj Karatsch (firma Interlana v roce 2012 ukončila činnost)
- Lacom, který je výrobcem laminovacích zařízení

První nánosování proběhlo v podniku Interlana, kde byl používán pro nanášení prášku na nosnou textilii nánosovací stroj značky Karatsch, který je na obr. 43.

Pro nánosování se používá práškový bodový způsob. Základní textilie, zde podšívka, a vrchní materiál se předeheje průchodem přes topné válce, které jsou vyhřívány olejem na 170 °C. Společně se základní textilií jsou tyto válce tlačeny proti horkému gravurovanému válci s teplotou 38 °C. Stěrka stírá povrch gravurovaného válce nahladko, díky tomu je nanášeno přesně vymezené množství prášku. Při styku ohřáté nosné textilie s povrchem gravurovaného válce dojde k přenesení aglomerovaných útvarů z gravury válce na textilii. Následným natavením a upevněním těchto kuliček prášku v infračerveném poli vzniknou body upevněné na nosné textilii. Teplota v infračerveném poli byla 170 °C.



Obr. 43: Nánosovací stroj značky Caratsch [28]

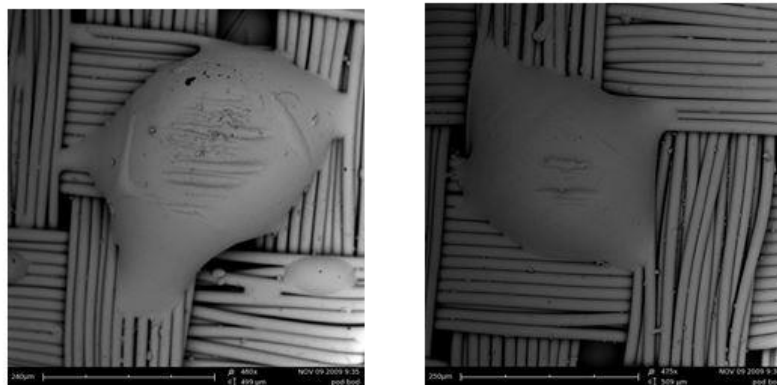
Teploty předeřívacích válců a bodového válce nastavuje obsluha stroje tak, aby obraz naneseného pojiva na nosnou textilii byl co nejlepší. Při nastavení vysokých teplot může docházet k rozlévání pojiva, a tím k tuhnutí podšívky či vrchního materiálu. Teploty se nastavují podle údajů, které poskytuje výrobce pojiva s tím, že obsluha může podle vlastního uvážení teplotu změnit, pouze však v určených tolerancích. Při tomto experimentu byly zvoleny co nejnižší přípustné teploty. To bylo dáno tím, že se jednalo o tenké syntetické materiály a v Interlaně s těmito materiály neměli žádnou zkušenost.

Teploty bodového a předeřívacího válce i teplota v infrapoli jsou snímány elektrickými čidly. Tyto hodnoty se zobrazují na ovládacím panelu nánosovacího stroje.

6.6.1 Velikost a vzájemná vzdálenost bodů

Velikost a vzájemná vzdálenost bodů určují množství nánosu pojiva, jejich rozmístění pak ovlivňuje omak podlepených dílů, ale také paropropustnost a pevnost spoje. Hustota bodů je udávána podobně jako hustota tiskařských sít počtem mesh - počet bodů pojiva nacházejících se na úhlopříčce čtverce s délkou strany 1 anglický palec.

Při experimentu byl použit válec horizontální s mesh 17, tedy 17 bodů na úhlopříčce s délkou strany 1 anglický palec. Průměr bodů je 0,77 mm a plošná hmotnost bodů je 15 až 20 g/m². Na obr. 44 je snímek z rastrovacího mikroskopu, kde je laminační bod uchycen na tkanině.



Obr. 44: Polymerní bod na podšívce vytvořený během nánosování

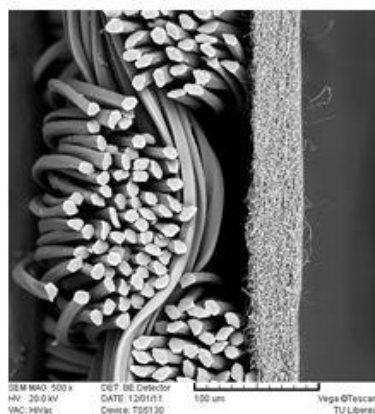
6.6.2 Vytvoření třívrstvého laminátu

Tato kapitola popisuje vznik dvou a třívrstvého laminátu. V předešlých kapitolách byly popsány způsoby výroby nanovláknenné vrstvy a její hydrofobizace a vytvoření laminačních bodů na vrchním a podšívkovém materiálu.

Dvouvrstvý laminát

Ke vzniku dvouvrstvého laminátu je zapotřebí vrchní tkanina s laminačními body a hydrofobizovaná nanovláknenná vrstva, která je stále na podkladovém materiálu. Při laminaci vrchního materiálu a hydrofobizované nanovláknenné vrstvy byl použit rozměr obou materiálů 50x50 cm. Na vrchní materiál ze strany laminačních bodů byla přiložena hydrofobizovaná nanovláknenná vrstva. Takto vzniklý útvar se položil na spodní část tělesa podlepovacího stroje značky Kannegiesser a na horní části tělesa se vytvořil potřebný tlak,

který byl o velikosti 3 barů, po dobu 15 sekund při teplotě 120 °C. Díky těmto parametrům došlo k roztavení bodů polymeru na vrchní látce a vznikl tak pevný dvouvrstvý laminát, který můžeme vidět na obr. 45, pořízeném z rastrovacího mikroskopu. Podkladová vrstva se posléze strhne.

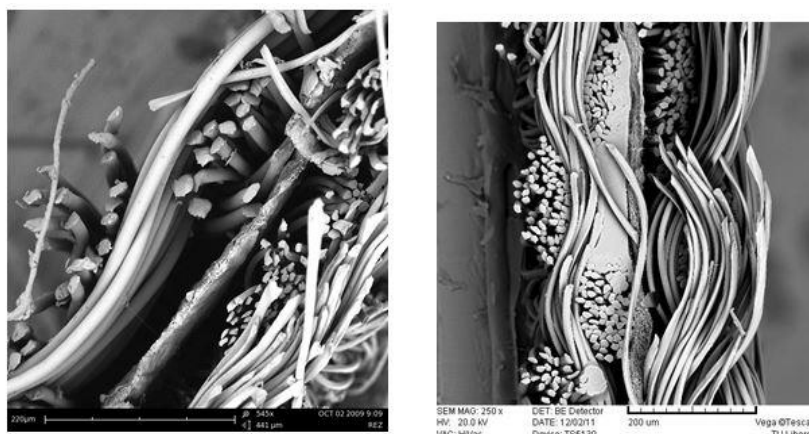


Obr. 45: Řez dvouvrstvým laminátem

Třívrstvý laminát

Ke vzniku třívrstvého laminátu je zapotřebí kromě vrchní tkaniny s laminačními body a hydrofobizované membrány také podšívkový materiál opatřený laminační body, stejně jako vrchní materiál.

Při laminaci třívrstvého laminátu se postupuje stejně jako u dvouvrstvého laminátu, avšak po vytvoření dvouvrstvého laminátu se odstraní podkladový materiál, na kterém byla zvlákněna nanovláknenná vrstva a na nanovláknennou vrstvu se přiloží podšívkový materiál ze strany laminačních bodů a znovu se vloží do polepovacího stroje. Podmínky laminace jsou stejné jako při tvorbě dvouvrstvého laminátu. Třívrstvý laminát s nanovláknennou membránou uprostřed můžeme vidět na obr. 46, pořízeném z rastrovacího mikroskopu.



Obr. 46: Řez 3-vrstvým laminátem

6.6.3 Kombinace nánosování a podlepování

K nánosování a k podlepování byla použita také průmyslová linka od německého výrobce Lacom. Jak již bylo popsáno v kapitole 6.6, tento stroj nanese laminační body a následně dochází k laminaci. Tudíž je tento proces kontinuální a tedy i rychlejší. Stejně jako v předchozí kapitole i na tomto zařízení byly vytvořeny dvou a třívrstvé lamináty.

Dvouvrstvý laminát

Stejně jak v předchozím případě byly laminační body vytvořeny na vrchním materiálu. Po nanesení laminačních bodů se materiál posouvá k laminačním válcům. Z horní části stroje je přivedena hydrofobizovaná nanovláknenná membrána, která je na podkladovém materiálu a těsně před laminovacími válci dojde ke styku nanovláknenné membrány s vrchní tkaninou a průtahem laminačním zařízením.

Podmínky laminování:

- teplota 140 °C
- tlak 3,5bar
- rychlost 1 m/min

Po vytvoření laminátu byla odstraněna podkladová textilie. Jako adhezivum byl použit PU a teplota glavurovacího válce byla 130 °C.

Třívrstvý laminát

Postup a podmínky nanesení adheziva a následné laminace je stejný jako při tvorbě dvouvrstvého laminátu, avšak po vytvoření dvouvrstvého laminátu je odstraněna podkladová textilie. Na podšívkový materiál se nanesou laminační body a před laminovacími válci je z horní části stroje přiveden dvouvrstvý laminát. Podšívka s laminačními body se dotýká dvouvrstvého laminátu ze strany nanovláknenné vrstvy.

7 Výsledky laminace nanovlákněné membrány s tkaninou

Vzhledem k předchozím výsledkům se dále pracovalo pouze s nanovlákněnou vrstvou hydrofobně upravenou pomocí nízkovakuové plazmy. Takto upravená nanovlákněná vrstva dosahuje obdobných hodnot (výsledků) jako membrány uvedené v (citaci), které byly uvedeny v rešeršní části. Výsledky dvou a třívrstevných laminátů vytvořených ve firmách Interlana a Lacom jsou uvedeny v tab. 26.

Tab. 26: Výsledky dvou a třívrstevných laminátů

PA 6 – 5 g/m ²		Bez laminace	Dvou-vrstvý laminát	Tří-vrstvý laminát	Dvou vrstvý laminát	Tří-vrstvý laminát
		Interlana			Lacom	
Paropropustnost Ret [Pa.m ² .W ⁻¹]	Průměr	< 0,1	1,33	2,37	1,33	2,33
	Směr. odchylka	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058
Prodyšnost [l/m ² /s]	Průměr	4,064	2,038	1,6	2,04	1,578
	Směr. odchylka	0,079	0,057	0,032	0,055	0,044
Hydrostatická odolnost [m]	Průměr	0,14	17	16,93	17,27	17,13
	Směr. odchylka	0,13	0,1	0,12	0,21	0,32
Počet pracích cyklů do delaminace		0	1	1	3	3

K tabulce 26 viz příloha č. 2

Tab. XIIIa: Výsledky dvou a třívrstevných laminátů - prodyšnost

Tab. XIIIb: Výsledky dvou a třívrstevných laminátů - paropropustnost

Tab. XIIIc: Výsledky dvou a třívrstevných laminátů - vodní sloupec

Dle výsledků je patrné, že i slaminovaná nanovlákněná membrána si stále zachovává velmi dobrou hydrostatickou odolnost. Naopak došlo ke zhoršení prodyšnosti, což je u vrchního oblečení žádoucí (zvyšuje se větruodolnost), a paropropustnosti. Zhoršení paropropustnosti a prodyšnosti je zapříčiněno samotnou laminací, resp. laminačními body (adheze). Avšak hodnota paropropustnosti i po laminaci je stále vysoká.

Laminát vytvořený v Interlaně měl sice nepatrně lepší paropropustnost, avšak prací cykly zaměřené na delaminaci materiálů propadl, resp. po prvním pracím cyklu došlo k delaminaci a k destrukci samotného materiálu. Naopak laminace na zařízení od firmy Lacom vydržela tři prací cykly, aniž by bylo zaznamenáno vizuální poškození laminátu.

8 Plánovaný experiment

Vzhledem k pozitivním výsledkům byl připraven plánovaný experiment.

- 1) Výroba nanovlákněné vrstvy na výrobním zařízení Nanospider
- 2) Plasmatická úprava nanovlákněné vrstvy
- 3) Laminace nanovlákněné vrstvy a tvorba dvouvrstvého laminátu

K tomuto plánovanému experimentu byly použity pouze ty postupy, které mají v předchozích experimentech optimální výsledky a se očekávalo, že povedou k naplnění cíle. Tedy vytvoření laminátu s nanovlákněnou membránou, která bude mít dostatečné komfortní vlastnosti, jako je vysoká paropropustnost a hydrostatická odolnost při zachování nízké prodyšnosti. Nejprve je nutné vytvořit nanovlákněnou vrstvu. Nanovlákněná vrstva byla vyrobena na výrobním zařízení Nanospider, a to typu NS Production Lines 1000 ve firmě Nanovia. Jako zvláknovací elektroda byla použita elektroda ve formě struny, a to v šíři 100 cm. Výchozí polymer byl použit PA6. Nanovlákněná vrstva byla vyrobena v plošných hmotnostech od 1 do 5 g/m² a 10 g/m², viz tab. 27. Jako podkladový materiál pro zvláknění byl použit spunlace z PL, viz kapitola 6.3 Podkladová textilie.

Tab. 27: Výsledky měření nanovlákněné vrstvy o plošných hmotnosti od 1 g/m² do 5 g/m² a 10 g/m²

Požadovaná plošná hmotnost [g/m ²]	Naměřená plošná hmotnost		Prodyšnost [l/m ² /s]	Paropropustnost Ret [Pa.m ² .W ⁻¹]
	průměr	pravděpodobnost		
1	0,996 (0,034)	0,402	16,02 (0,084)	< 0,1
1,5	1,524 (0,052)	0,179	11,22 (0,13)	< 0,1
2	2,004 (0,032)	0,397	8,84 (0,029)	< 0,1
2,5	2,516 (0,051)	0,262	6,92 (0,07)	< 0,1
3	3,032 (0,069)	0,179	5,92 (0,012)	< 0,1
3,5	3,488 (0,067)	0,355	5,27 (0,015)	< 0,1
4	4,062 (0,09)	0,1	4,96 (0,074)	< 0,1
4,5	4,498 (0,033)	0,45	4,49 (0,019)	< 0,1
5	4,988 (0,062)	0,343	4,11 (0,013)	< 0,1
10	10,024 (0,13)	0,351	1,14 (0,079)	< 0,1

Z tab. 27 je patrný očekávaný efekt, který se nám již z několika předchozích experimentů potvrdil. S rostoucí plošnou hmotností klesá prodyšnost. Do 4 g/m^2 nemá plošná hmotnost vliv na paropropustnost, avšak nad 4 g/m^2 paropropustnost mírně vrůstá. Vodní sloupec nebyl měřen, jelikož se nejednalo o neupravenou vrstvu a z předchozích měření víme, že výška vodního sloupce nebyla vyšší jak 30 cm.

Po vyrobení nanovlákněné vrstvy následovala hydrofobizace nanovlákněné vrstvy k docílení dostatečné hydrostatické odolnosti. Hydrofobizace proběhla pomocí plasmu typu roll-to-roll od výrobce Europlasma, který dodal i svůj patentovaný hydrofobní prostředek na bázi fluorkarbonu typu C6 bez PFOA a PFOS. Výsledky úpravy jsou uvedeny v tab. 29.

Podmínky úpravy:

- rychlost úpravy 1m/min
- tlak 100 mili Torrů
- teplotě 40°C

Z tab. 28 je patrné, že hydrostatická odolnost se výrazně zvyšuje od plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy od 2 g/m^2 . Do plošné hmotnosti 2 g/m^2 jsou výsledky hydrostatické odolnosti kolísavé, avšak nesterjnoměrnost nanovlákněné vrstvy nebyla naměřena. Rozdíl v hydrostatické odolnosti mezi 5 a 10 g/m^2 prakticky není žádný a nelze je považovat za rozdílný. Pravděpodobně to může být způsobeno tím, že hydrofobní látka, v našem případě fluorkarbon, nedokázal proniknout celou tloušťkou nanovlákněné vrstvy. Paropropustnost a prodyšnost zůstaly stejné jako před hydrofobní úpravou.

Tab. 28: Výsledky úpravy

Plošná hmotnost nanovlákněné vrstvy [g/m ²]		Prodyšnost [l/m ² /s]	Paropropustnost Ret [Pa.m ² .W ⁻¹]	Vodní sloupec [m]	Spray test
1	Průměr	16,06	< 0,1	0,83	100 ISO 5
	Směr. odchylka	0,182		0,341	-
1,5	Průměr	11,2	< 0,1	1,6	100 ISO 5
	Směr. odchylka	0,234		0,915	-
2	Průměr	8,84	< 0,1	5,83	100 ISO 5
	Směr. odchylka	0,04		1,331	-
2,5	Průměr	6,97	< 0,1	7,98	100 ISO 5
	Směr. odchylka	0,053		0,493	-
3	Průměr	5,92	< 0,1	7,78	100 ISO 5
	Směr. odchylka	0,033		0,373	-
3,5	Průměr	5,26	< 0,1	8,45	100 ISO 5
	Směr. odchylka	0,023		0,232	-
4	Průměr	4,98	< 0,1	8,27	100 ISO 5
	Směr. odchylka	0,032		0,880	-
4,5	Průměr	4,49	0,033	8,54	100 ISO 5
	Směr. odchylka	0,038	00,058	0,842	-
5	Průměr	4,11	0,067	8,98	100 ISO 5
	Směr. odchylka	0,02	0,058	0,527	-
10	Průměr	1,15	< 0,1	9,08	100 ISO 5
	Směr. odchylka	0,043		0,692	-

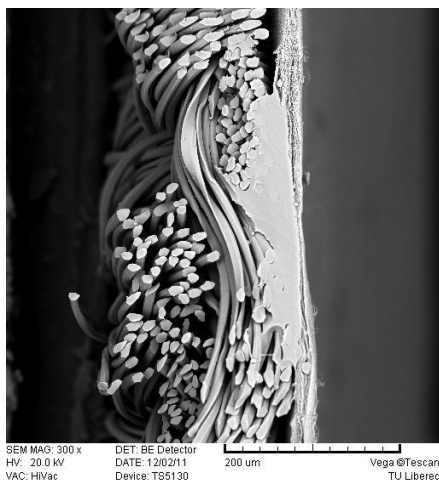
Jako poslední krok je laminace nanovlákněné vrstvy tak, aby se mohla nanovlákněná membrána používat pro oděvní účely. Byl vytvořen dvouvrstvý laminát, tedy hydrofobizovaná nanovlákněná membrána se syntetickou tkaninou z PA, pevnost osnovy 370 N, pevnost útku 420 N a martingale (oděr) 15 000 ot. Laminace probíhala na laminovacím zařízení Lacome, bližší informace o tomto zařízení a podmínky laminování jsou popsány v kapitole 5.7. V tab. 30 jsou zaznamenány výsledky dvouvrstvého laminátu s hydrofobizovanou nanovlákněnou membránou.

Tab. 29: Výsledky měření dvou-vrstvého laminátu s hydrofobizovanou nanovláknennou membránou

Plošná hmotnost nanovláknenné vrstvy [g/m ²]		Prodyšnost [l/m ² /s]	Paropropustnost Ret [Pa.m ² .W ⁻¹]	Vodní sloupec [m]
1	Průměr	11,84	1,33	1,1
	Směr. odchylka	0,472	0,058	0,46
1,5	Průměr	10,16	1,33	1,76
	Směr. odchylka	0,207	0,058	0,45
2	Průměr	7,58	1,37	8,97
	Směr. odchylka	0,158	0,058	0,95
2,5	Průměr	5,92	1,33	9,97
	Směr. odchylka	0,084	0,058	0,90
3	Průměr	4,28	1,37	11,63
	Směr. odchylka	0,084	0,058	1,10
3,5	Průměr	3,78	1,33	13,53
	Směr. odchylka	0,084	0,058	0,71
4	Průměr	3,1	1,37	15,53
	Směr. odchylka	0,122	0,058	0,40
4,5	Průměr	1,96	1,37	16,77
	Směr. odchylka	1,085	0,058	0,23
5	Průměr	2,02	1,47	17,17
	Směr. odchylka	0,084	0,058	0,21
10	Průměr	0,87	0	17,8
	Směr. odchylka	0,022	0	0,26

Z tab. 29 je patrné, že po laminaci nanovláknenné membrány došlo k nárůstu vodního sloupce a samozřejmě ke snížení prodyšnosti a paropropustnosti, která byla zapříčiněna jak samotnou tkaninou, tak i laminací, resp. laminašními body (adheze). Výška vodního sloupce byla navýšena tím, že se zvýšila pevnost nanovláknenné membrány, resp. celého laminátu oproti měření hydrostatické odolnosti samotné membrány pouze s přiloženou mřížkou. Zvýšení pevnosti nanovláknenné membrány je způsobeno právě laminací, kdy dojde k

proniknutí adheziva, v našem případě na bázi PU, skrz celou nanovláknennou vrstvu, viz obr 47, a tím dojde již ke zmíněné pevnosti nanovláknenné membrány, resp. celého laminátu.



Obr. 47: Proniknutí adheziva PU, skrz celou nanovláknennou vrstvu

Pro ověření této teorie se použila tkanina PA/CO 50%/50%, která měla pevnost osnova 1312 N, pevnost útku 515 N a martindale (oděr) 35 000 ot. Byl vytvořen laminát s nanovláknennou membránou o plošné hmotnosti 3 a 5 g/m². Postup výroby, úpravy a laminace nanovláknenné membrány byl stejný jako v předchozím příkladu. Výsledky jsou zaznamenány v tab. 30.

Tab. 30: Výsledky měření nanovláknenné membrány s tkaninou PA/CO 50%/50%

Plošná hmotnost nanovláknenné vrstvy [g/m ²]		Prodyšnost [l/m ² /s]	Paropropustnost Ret [Pa.m ² .W ⁻¹]	Vodní sloupec [m]
3	Průměr	3,15	4,03	17,44
	Směr. odchylka	0,059	0,058	0,50
5	Průměr	2,18	4,07	23,06
	Směr. odchylka	0,087	0,058	0,14

Z tabulky je patrné, že s tkaninou, která má vyšší pevnost a nižší tažnost je možné dosáhnout vyššího vodního sloupce, což potvrzuje teorii z výsledků z tab. 30.

9 Diskuze výsledků

Cílem této disertační práce bylo vyvinutí nanovlákněné membrány pro oděvní účely, která bude maximálně paropropustná, 100% větruodolná a s dostatečně vysokým vodním sloupcem. Jak již bylo uvedeno v rešeršní části této práce, existují práce zabývající se touto problematikou, avšak především na laboratorní úrovni, čemuž odpovídají i samotné výsledky, resp. výstupy, kterými jsou především pouze nanovlákněné membrány, nikoliv lamináty. Navíc samotné měření je zaměřeno zase spíše jen na paropropustnost, prodyšnost a hydrofobitu nanovlákněné vrstvy a ne na samotnou hydrostatickou odolnost. Navíc prezentované výsledky nejsou konkurenceschopné membránám, které jsou k dostání na běžném trhu. Membránám, které jsou běžně dostupné na trhu, resp. průmyslově vyráběné, je v této práci věnována samostatná kapitola, protože je velmi důležité výsledky výzkumu a vývoje porovnávat i s komerčními výrobky, které jsou běžně dostupné na trhu.

Tato práce byla od samého začátku zaměřena na vývoj nejen nanovlákněné membrány, ale i laminátu obsahujícího právě nanovlákněnou membránu, tedy na finální produkt, ze kterého je možné vytvořit reálný výrobek. Samotná nanovlákněná membrána nemůže sama o sobě být použita v oděvu, pokud se tedy nejedná o laminát typu Z-liner, který se používá výhradně a pouze pro rukavice. Nanovlákněná membrána, ale i membrány pro oblečení jsou velmi jemné a snadno se mohou poškodit, proto je nutná jejich laminace.

Experimentální část této práce začíná výrobou nanovlákněné vrstvy. Samotná výroba byla provedena na průmyslových strojích, a to na stroji Nanospider od společnosti Elmarco (ČR), dále Spur Line od firmy Spur (ČR) a na lince Fiberio, od společnosti Fiberio (USA). První dvě jmenované linky pracují na principu elektrospinnu, naopak linka od společnosti Fiberio na principu odstředivého zvlákňování. Jako polymer pro zvlákňování nanovlákněné vrstvy byl vybrán PU a PA6. Po analýze nanovlákněných vrstev bylo možné konstatovat, že nanovlákněná vrstva vyrobená na zvlákňovacím zařízení Nanospider dosahovala nejvyšší homogenity, a proto pro další vývoj se pokračovalo již pouze na Nanospideru. Nanovlákněná vrstva vyrobená na lince Spin Line vykazovala velkou nehomogenitu jak v podélném, tak i v příčném směru, což potvrdilo i samotné měření. Nanovlákněná vrstva na lince Fiberio sice nevykazovala nehomogenitu, avšak pro její velkou objemnost byla horší paropropustnost, která je velmi důležitým kritériem membrán pro oděvní účely.

Nanovlákněná vrstva vyrobená na zvlákňovacím zařízení Nanospider dosahovala dobrých hodnot v paropropustnosti, bohužel hydrostatická odolnost nebyla zcela dostačující.

Výška vodního sloupce byla řádově v jednotkách cm, proto dalším krokem bylo zvýšení hydrofobity nanovlákněné vrstvy. Jako první způsob navýšení hydrofobních vlastností nanovlákněné vrstvy byl použit fulár. Pro zvýšení hydrofobity byly vybrány hydrofobní prostředky na bázi fluorkarbonu a silikonu. Sice došlo ke zvýšení výšky vodního sloupce, avšak ne dostatečně, a navíc došlo ke zhoršení paropropustnosti nanovlákněné vrstvy.

Ovšem, při tomto postupu se prokázalo, že měření kontaktního úhlu smáčení není vůbec vhodný pro nanovlákněné membrány s požadavkem na vysokou hydrostatickou odolnost. Důkazem je, že nanovlákněná vrstva o plošné hmotnosti 1 g/m^2 měla stejný kontaktní úhel smáčení jako nanovlákněná vrstva o plošné hmotnosti 5 g/m^2 , ale výška vodní sloupce se lišila i o více jak 1 200 cm. Navíc došlo i k velkým rozdílům mezi nanovlákněnou vrstvou vyrobenou z polymerů PU a PA6. Polymer PU měl vyšší hydrofobitu dle měření kontaktního úhlu, jelikož nebyla nanovlákněná vrstva z PU schopna absorbovat tolik hydrofobního prostředku jako PA 6, který paradoxně vykazoval menší hydrofobní vlastnosti. Totéž prokázal experiment s mokřým přivažkem. Proto se dále pracovalo již pouze s nanovlákněnou vrstvou z PA 6.

Dalším typem úpravy bylo použití postřiku nanovlákněné vrstvy. Tento postup byl na základě výsledků patentován. Jedná se o nanášení hydrofobního prostředku pomocí stříkací pistole s cílem proniknutí hydrofobního prostředku do samotné struktury nanovláken. Sice se podařilo dosáhnout velmi dobrých hodnot vodního sloupce až 1 300 cm, ale došlo k výraznému zhoršení paropropustnosti, což bylo dáno velkým zakrytím pórů v nanovlákněné vrstvě.

Poslední metodou ke zvýšení hydrofobních vlastností nanovlákněné vrstvy byla použita nízkovakuová plasma typu roll-to-roll, resp. nanášení fluorkarbonového hydrofobního prostředku pomocí plasmy. I tato metoda byla následně patentována. Výsledkem byl nejenom dostatečně vysoký vodní sloupec nanovlákněné vrstvy, který dosahoval až k 900 cm a po následné laminaci dokonce až k 1 700 cm, ale především při této úpravě nedošlo ke zhoršení paropropustnosti. Tato poslední metoda vedla k pozitivnímu výsledku.

Dalším a zároveň posledním krokem byla laminace nanovlákněné vrstvy. K laminaci byly použity dvě rozdílné technologie i adheziva. První metoda proběhla na strojním zařízení Karatsch, kde jako adhezivum byl použit kopolyamid. Nejdříve došlo k nánosu adheziva a poté na laminovacím zařízení došlo k samotné laminaci a k vytvoření dvou a třívrstevých laminátů. Druhá metoda proběhla na zařízení od firmy Lacom, kde jako adhezivum byl použit

PU. Toto výrobní zařízení je schopno jak nanášet laminační body, tak i laminovat v jednom pracovním kroku, právě proto bylo možné použít adhezivum na bázi PU.

Následně bylo provedeno měření dvou a tří vrstevých laminátů, které se v komfortních vlastnostech téměř nelišily, avšak po prvním praní došlo k delaminaci laminátu vyrobeného na zařízení od firmy Karatsch. Laminát vyrobený na výrobním zařízení Lacome vydržel více jak 3 prací cykly.

Podářilo se vyvinout zcela novou nanovláknennou membránu z PA 6, která je vhodná pro oděvní účely. Dále z této membrány vytvořit dvou a třívrstvé lamináty, které mají velmi dobré komfortní vlastnosti, tedy extrémní paropropustnost, nízkou prodyšnost a vysokou hydrostatickou odolnost. Navíc se podařilo prokázat, že pro nanovláknenné membrány pro oděvní účely není vhodné používat metodu měření kontaktního úhlu smáčení. Důvodem je, jak již bylo napsáno a experimentálně prokázáno, že je nutná dokonalá hydrofobita celé nanovláknenné vrstvy a nejen její povrch. Kontaktní úhel smáčení je metoda měřící pouze hydrofobitu povrchu a nebere v úvahu případně působící tlaky tak, jako je tomu při měření hydrostatické odolnosti.

V disertační práci se docílilo velmi dobrých a zajímavých výsledků, avšak určitě by bylo vhodné se v budoucnu zaměřit na:

- prostup hydrofobního prostředku do samotné nanovláknenné vrstvy, jelikož i u vyšších plošných hmotností nebyl zaznamenán výrazný nárůst hydrostatické odolnosti.
- odolnost laminátu při praní, kde jako optimum je bráno okolo deseti pracích cyklů.
- tažnost nanovláknenné membrány.

I přes zmíněné nedostatky a případné další návrhy na měření či výzkum v této oblasti se započalo s průmyslovou výrobou této nanovláknenné membrány v České republice ve společnosti Nanomembrane s.r.o. V příloze č. 3 je uveden protokol měření membrány nezávislou německou institucí Hohenstein institute.

10 Závěr

V této práci se došlo k těmto závěrům:

- Vyvinula se nanovláknenná membrána pro oděvní účely (sport, outdoor, civilní sektor). Oproti ostatním publikacím se došlo k podstatně lepším výsledkům.

- Na základě této práce byla realizována průmyslová výroba nanovláknenné membrány, včetně její laminace.

- Byla realizována výroba nanovláknenných vrstev na několika různých výrobních zařízeních, včetně různých podkladových materiálů pro nanovláknenné vrstvy a včetně proměření všech důležitých vlastností jako je prodyšnost, paropropustnost, plošná hmotnost, hydrostatická odolnost atd.

- Byly realizovány a porovnány tři různé způsoby realizace a dvě z nich patentovány. Jednalo se hydrofobizaci pomocí postřiku, fuláru a plaz my.

- Hydrofobizované nanovláknenné membrány byly laminovány s vrchovými a případně podšívkovými materiály. Byly vytvořeny dvou a třívrstvé lamináty.

- Poprvé byly porovnány vlastnosti nanovláknenných vrstev z hlediska několika vlastností (prodyšnost, paropropustnost, hydrostatická odolnost, úhel smáčení) a bylo zjištěno, že nanovláknenné membrány dosahují výrazně lepších hodnot oproti ostatním membránám, ať už hydrofilních či hydrofobních.

- Bylo zjištěno, že hydrofobita měřená úhlem smáčení, není v korelaci s hydrostatickou odolností.

Seznam použité literatury

- [1] Knížek, R., Oděvy pro sportovní a outdoorové aktivity. Technická univerzita v Liberci. Liberec, 2013. 1. ISBN 978-80-7494-012-5.
- [2] Hes, L., Sluka, P., Úvod do komfortu textilií, Technická univerzita v Liberci, Liberec 2005.
- [3] Šesták, J., Rieger, F., Přenosové jevy I. Skriptum ČVUT Praha, 1980
- [4] Macháček, P., Hotmar, V., Víte, co si oblékáte? Svět outdooru: outdoor, turistika, hory, voda [online]. 2007 [cit. 2012-02-15]. Dostupné z: <http://www.svetoutdoru.cz/>
- [5] GORE-TEX: Technologie a Textilie. In: [online]. 2014, 2014 [cit. 2014-10-3]. Dostupné z: <http://www.gore-tex.com/>
- [6] EVent: eVent Technology. In: BUK, Jan. [online]. 2013 [cit. 2014-09-20]. Dostupné z: <http://eventfabrics.com/>
- [7] Porelle: Porelle Membrane Divisions. PORELLE. [online]. 2014 [cit. 2014-09-04]. Dostupné z: <http://www.pilmembranes.com/en/porelle/>
- [8] SympaTex: THE SYMPATEX MEMBRANE. SYMPATEX. [online]. [cit. 2014-10-23]. Dostupné z: <http://www.sympatex.com/en/membrane/225/properties>
- [9] Dermizax. DERMIZAX. [online]. [cit. 2014-10-02]. Dostupné z: <http://www.highpoint.cz/materialy2/dermizax.html>
- [10] BlocVeht: O materiálu. BLOCVENT. [online]. [cit. 2014-09-12]. Dostupné z: <http://www.highpoint.cz/blocvent.html>
- [11] Gelanots XP. GELANOTS. [online]. [cit. 2014-08-20]. Dostupné z: <http://www.pinguincz.cz/cs/gelanots.htm>
- [12] Finetex. FINETEX. [online]. [cit. 2014-09-04]. Dostupné z: <http://www.finetex.net/>
- [13] Polartec Fabrics. POLARTEC. [online]. [cit. 2014-09-04]. Dostupné z: <http://polartec.com/>
- [14] DuPont: PRODUCT FINDER. DUPONT. [online]. 2014 [cit. 2014-09-04]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/>

- [15] Donaldson: Přehled produktů. DONALDSON. [online]. 2002-2014, 2014 [cit. 2014-09-04]. Dostupné z: <http://www.donaldson.com/index.html>
- [16] Hyung. G., Metal-Dielectric-CNT Nanowires for Femtomolar Chemical Detextion, *Advanced Materials*, 2013
- [17] Obendorf, S. K., Omproving Personal Protection Through Novel Materials. *AATCC Review*. 2010, Sv. 10, 4, stránky 42 – 50.
- [18] Ahn, H. W., Park, Ch. H., Chung, S. E., Waterproof and breathable properties of nanoweb applied clothing. *Textile Research Journal*. 2011, Sv. 81, 14, stránky 1438 – 1447.
- [19] Mufang, L., Hight performance filtration nanofibibrous membranes based on hydrophilic poly(vinylalkohol-co-ethylene) copolymer, ISSN 0011-9164, 2013
- [20] Gibson, P., Transport properties of porous membranes based on electrospun nanofibers, Material Science, AMSSB-RSS-MS, USA, 2001
- [21] Yoon, H., Park, J. H., Kim, G. H., A Superhydrophobic Surface Fabricated by an Electrostatic Process. *Macromoleculuar Rapid Communications*. Sv. 31, 16, stránky 1435 – 1439.
- [22] Bagherzadeh, R., Latifi, M., Najar S. S., Tehran, M. A., Gorji, M. a Kong, L., Transport properties of multi-layer fabric based on electrospun nanofiber mats as a breathable barrier textile materiál. *Textile Research Journal*. 2012, Sv. 82, stránky 70 – 76.
- [23] M. Gorji, M., Jeddi, A. A. A., Gharehaghaji, A. A., Fabrication and characterization of polyurethane electrospun nanofiber membranes for protective clothing applications. 2012, Sv. 125, 5, stránky 4135 - 4141.
- [24] Lee, S., a Obendor, S. K., Transport Properties of Layered Fabric Systems Based on Electrospun Nanofibers. *Fibers and Polymers*. 2007, Sv. 8, 5, stránky 501 – 506.
- [25] Lee, S., Kimura, D., Yokoyama, A., Lee, K. H., Park, J. C. a Kim, I. C., The Effects of Laundering on the Mechanical Properties of Mass-produced Nanofiber Web for Use in Wear. *Textile Research Journal*. 2009, Sv. 79, stránky 1085 – 1090.

- [26] Kang, Y. K., Park, Ch. H., Kim, J., Kang, T. J., Application of electrospun polyurethane web to breathable water-proof fabrics. *Fibers and Polymers*. 2007, Sv. 8, 5, Stránky 564 – 570.
- [27] *US 2008/0220676 A1 - LIQUID WATER RESISTANT AND WATER VAPOR PERMEABLE GARMENTS*. United States: Patent Application Publication. 2008.
- [28] *US 2011/0092122 A1. - WIND RESISTANT AND WATER VAPOR PERMEABLE GARMENTS*. United States: Patent Application Publication. 2008.
- [29] Formhals, A., United States: Patent Application Publication. US patent 1. 975, 504. 1934.
- [30] Formhals, A., United States: Patent Application Publication. US patent 2. 160,962. 1939.
- [31] Formhals, A., United States: Patent Application Publication. US patent 2. 187,306. 1940.
- [32] Formhals, A., United States: Patent Application Publication. US patent 2. 323, 025. 1943.
- [33] Formhals, A.: United States: Patent Application Publication. US patent 2. 349,950. 1944.
- [34] Vonnegutem Neubairem
- [35] Jirsík, O., Kalinová, K. Netkané textilie, *Technická univerzita v Liberci*, Liberec. 2003.
- [36] Růžičková, J., Elektrostatické zvlákňování nanovláken, *Technická univerzita v Liberci*, Liberec 2004.
- [37] Lukášová, I., Taylor, [online] prezentace, [cit. 2004 –04 –12] dostupné na World Wide Web: http://www.ft.vslib.cz/depart/knt/nove/obsah=studium/stranky_predmetu/mit
- [38] Lev, J., Can nonofibers replace current microfiltration materials? Nanocon, Brno, 2013
- [39] Buk, J., Nanomateriály v praxi, výzkum, vývoj a výroba nanovláknenných materiálů: Odstředivé zvlákňování [online]. 2012 [cit. 2014-09-20]. Dostupné z: http://www.ft.tul.cz/studenti/seminar_doktorandu/seminare_2011-2012/buk_2012.pdf

- [40] Dombrow, B. A., Polyuretany, SNTL, Praha 1961.
- [41] Mleziva, J., Polymery - struktura, vlastnosti a použití, Sobotales, Praha 1993.
- [42] Marsano, E., Francis, L., Giunco, F., Polyamide 6 nanofibrous nonwovens via electrospinning. *Journal of Applied Polymer Science*. 2010, Sv. 117, 3, stránky 1754 – 1765.
- [43] Shi, L., Zhuang, X., Tao, X., Cheng, B., Kang, W., Solution Blowing Nylon 6 Nanofiber Mats for Air Filtration. *Fibers and Polymers*. 2013, Sv. 14, 9, stránky 1485-1490.
- [44] Guibo, Y., Qing, Z., Yahong, Z., Yin Y., Yumin, Y., The electrospun polyamide 6 nanofiber membranes used as high efficiency filter materials: Filtration potential, thermal treatment, and their continuous production. *Journal of Applied Polymer Science*. 2012, SV. 128, 2, stránky 1061 – 1069.
- [45] Mannarino, M. M., Rutledge, G. C., Mechanical and tribological properties of electrospun PA 6(3)T fiber mats. *Polymer*. 2012, Sv. 53, 14, stránky 3017 – 3025.
- [46] Tan, K., Obendorf, S. K., Fabrication and evaluation of electrospun nanofibrous antimicrobial nylon 6 membranes. *Journal of Membrane Science*. 2007, Sv. 305, stránky 287 – 298.
- [47] Kryštůfek J. a kol., Technologie zušlechtování, ISBN 80-7083-560-5, Liberec 2002
- [48] Kiss, E., Handbook of Fiber Science and Technology, vol. II, *Chemical Processing of Fibers and Fabrics. Functional Finishes*. Part B. Levin M and Sellon S. B. New Yourk, Marcel Dekker. 1984, stránky 159 – 172.
- [49] Chvala, A., Anger, V., Handbuch der Textilhilfsmittel. *Weinheim*, 1977.
- [50] Sahin, O. P., Stain removal characteristics of fabrics and stain-resistance/repase finishing. *Textile Dyer & Printer*. 1987. Sv 20, 25, Stránky 24 – 27.
- [51] Duschek, G., Emissionsarme und APEO-FRIE Fluorcarbon_Austrüstung. *Melliand Textilberichte*. 2001. Sv. 82, 7/8, stránky 135 – 213.
- [52] Schindler, W. D., Hauser, P. J., Chemical finishing of textiles. *The textile Institute*. CRC Press LLC, 2004. ISBN 1 85573 905 4.

- [53] Biederman, H., Plasma polymer Films, London, 2004, Imperial College Press.
- [54] Coulson, S. R., Woodward, I. S., Badyal, J. P. S., Brewer, S. A., Willis, C. R., Plasmachemical functionalization of solid surfaces with low surface energy perfluorocarbon chains, *Langmuir*, 2000, 16, 6287-6293.
- [55] Shishoo, R., Plasma technologies for textiles, *The Textile Institute*, Cambridge England, 2007.
- [56] Schutze, A., The atmospheric-pressure plasma jet: a review and comparison to other plasma sources. *Plasma Science, IEEE Transactions*. 2002, Sv. 26, 6, stránky 1685 – 1694.
- [57] Ma, M., Hill, R. M., Superhydrophobic surfaces. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2006, Sv. 11, 4, Stránky 193 – 202.
- [58] Han, D., Steckl, A. J., Superhydrophobic and Oleophobic Fibers by Coaxial Electrospinning. *Langmuir*. 2009, Sv. 25, 16, stránky 9454 – 9462.
- [59] Yoon, H., Park, J. H., Kim, G. H., A Superhydrophobic Surface Fabricated by an Electrostatic Process. *Macromolecular Rapid Communications*. Sv. 31, 16, stránky 1435 – 1439.
- [60] Liao, Y., Wang, R., Tian, M., Qiu, Ch., Fane, A. G., Fabrication of polyvinylidene fluoride (PVDF) nanofiber membranes by electro-spinning for direct contact membrane distillation. *Journal of Membrane Science*. 2013, Sv. 425-426, Stránky 30 -39.
- [61] Ma, M., Hill, R. M., Lowery, J. L., Fridrich, S. V., Rutledge, G. C., Electrospun Poly(Styrene-block-dimethylsiloxane) Block Copolymer Fibers Exhibiting Superhydrophobicity. *American Chemical Society*. 2005, Sv. 21,12, stránky 5549 – 5554.
- [62] Jonoobi, M., Harun, J., Hathew, A. P., Hussein, M. Z. B., Oksman, K., Preparation of cellulose nanofibers with hydrophobic surface characteristics. *Cellulose*. 2010, Sv. 17, 2, stránky 299 – 307.
- [63] Gautam, A. K., Lai, Ch., Fong, H., Menkhaus, T. J., Electrospun polyimide nanofiber membranes for high flux and low fouling microfiltration applications. *Journal of Membrane Science*. 2014. Sv. 466, stránky 142 – 150.

- [64] Hsieh, Ch. T., Fan, W. S., Superhydrophobic behavior of fluorinated carbon nanofiber arrays. *Applied Physics Letters*. 2006. Sv. 88, stránky 42 – 50.
- [65] Lee, M., Ko, Y. G., Lee, J. B., Park, W. H., Cho, D., Kwon, O. H., Hydrophobization of silk fibroin nanofibrous membranes by fluorocarbon plasma treatment to modulate cell adhesion and proliferation behavior. *Macromolecular Research*. 2014. Sv. 22, 7. stránky 746 – 752.
- [66] Thordvaldsson, A., Edvinsson, P., Glantz, A., Rodrigues, K., Wlkenstrom, P., Gatelm, P. Superhydrophobic behaviour of plasma modified electrospun cellulose nanofiber-coated microfibers. *Cellulose*. 2012, Sv. 19, 5, stránky 1743 – 1748.
- [67] Thordvaldsson, A., Edvinsson, P., Glantz, A., Rodrigues, K., Wlkenstrom, P., Gatelm, P., Superhydrophobic behaviour of plasma modified electrospun cellulose nanofiber-coated microfibers. *Cellulose*. 2012, Sv. 19, 5, stránky 1743 – 1748.
- [68] Vestamelt [online]. Německo: Vestamelt, [cit. 2005 –03 –23]. Dostupné na WWW: <<http://www.vestamelt.com>>.
- [69] Nanofiber Equipment. Elmarko. [online]. 2004- 2013 [cit. 2014-10-12]. Dostupné z: <http://www.elmarco.com/nanofiber-equipment/nanofiber-equipment/>.
- [70] Jirsak, O., Petrik S., Recent advances in nanofibre technology: needleless electrospinning. *Journal of Nanotechnology*. 2012, Sv. 9, 8/9, stránky 836 – 845.
- [71] Technologie konfekčního tvarování: technologie podlepování. In: [online]. 2010 [cit. 2014-10-3]. Dostupné z: http://www.kod.tul.cz/ucebni_materialy/tvarovani/podlepovani/podlepovani.htm.
- [72] Lacom: Lamination of PP spunbond fabrics: Technology & Machinery. In: Allgemeiner Viliesstoff-Report Nanowovens&Technical Textiles [online]. 16.4.2014, 2014 [cit. 2014- 09-04]. Dostupné z: <http://www.verpackungsrundschau.de/home/news/technology+machinery/lacom+lamination+of+pp+spunbond+fabrics+.119327.htm>.
- [73] Liu, L., Huang, Z. M., He, C. L., Han, X. J., Mechanical performance of laminated composites incorporated with nanofibrous membranes. *Materials Science and Engineering: A*. 2006, Sv. 435 – 436, stránky 309 – 317.

- [74] Meloun, M., Militký, J., Statistické zpracování experimentálních dat. 1.vyd., *Praha:Plus*, 1994, ISBN 80-85297-56-6.
- [75] Cyhelský, L., Kahounová, J., Hindls, R., Elementární statistická analýza. 1. Vyd. *Praha:Management Press*, 1996, ISBN 80-85943-18-2.
- [76] Hendl, J., Analýza a metaanalýza dat. 3. Vyd., *Praha:Portál*, 2009, ISBN 9787-80-7367-482-3.
- [77] Dhucháček, V., Ducháček, V., Polymery, výroba, vlastnosti, zpracování, použití, *VŠCHT Praha*, 80-7080-617-6, stran 280, 2006.
- [78] Militký, J., Textilní vlákna, Technická univerzita v Liberci, Liberec 2002.
- [79] Boram, Y. S., Designing Waterproof Breathable Materials Based on Electrospun Nanofibers and Assessing the Performance Characteristics, *Nanomedicine*, Seoul 120-749, Korea 2011, stránky 57-64.
- [80] Faccini, M., Vaquero, C., Amantia, D., Development of Protective Clouthing against Nanoparticle Based on Electrospun Nanofibers., *Journal of Nanomaterials* 2012, číslo článku: 892894.
- [81] Chen, Y., Han, DH., Ouyang, W., Chen SL., Hou, HQ., Zhao, Y., Fong, H., Fabrication and evaluation of polyamide 6 composites with electrospun polyimide nanofibers as skeletal framework, *Composites part b-engineering*, 2012, SV. 43, 5 stránky 2382-2388.
- [82] Munzarová, M., Barrier fabric containing nanofiber layer, *Fibers for Progress* 2014.
- [83] Laminated fabric produced by elektrospun nanofibers, *Modern Concepts in Nanotechnology Research* 2013, stránky 105 – 115.

Seznám obrázků

Obr. 1: Schéma funkce membrány	17
Obr. 2: Schéma Newtonova ochlazovacího zákona [5]	23
Obr. 3: Teplotní mezní vrstva na ploché desce	25
Obr. 4: Prostup vlhkosti do okolního prostředí	28
Obr. 5: Odvod vlhkosti z volného povrchu kůže odparem [2].....	29
Obr. 6: Permetest [2]	31
Obr. 7: Zjednodušené měření hydrostatické odolnost.....	32
Obr. 8: Vrstvené oblékání [4].....	33
Obr. 9: Ukázka struktury termoprádla - vlevo letní, vpravo zimní [4]	35
Obr. 10: Membrána z PTFE od firmy Gore-tex	38
Obr. 11: Schéma postupu výroby laminátu s nanovláknennou vrstvou	44
Obr. 12: Schéma jednoduchého zvlákňovacího zařízení [35].....	45
Obr. 13: Tvorba Taylorova kuželu na hladině kapaliny v silném elektrostatickém poli [37]..	46
Obr. 14: Zařízení Nanospider pro výrobu nanovláken elektrostatickým zvlákňováním [36]..	46
Obr. 15: Spin Line 120 [38]	47
Obr. 16: Schéma zařízením na odstředivé zvlákňování	48
Obr. 17: Schéma řetězce fluorkarbonu.....	58
Obr. 18: Nizkovakuová plasma typu roll-to-roll [55]	60
Obr. 19: Postup tvorby superhydrofobního povrchu [60]	63
Obr. 20: a) Řez dvou vrstvým laminátem, b) Schéma funkčnosti dvouvrstvého laminátu.....	65
Obr. 21: Schéma dvou-vrstvého laminátu s volnou podšívkou	65
Obr. 22: Schéma dvou a půlvrstvého laminátu	66
Obr. 23: a) Řez tří - vrstvým laminátem, b) Schéma tří - vrstvého laminátu.....	66
Obr. 24: Schéma volně vložené membrány mezi textilní materiál (Z liner).....	67
Obr. 25: Znázornění nanosené pojivové vrstvy spojitě [67]	67
Obr. 26: Nánosování a) posypem, b) tiskem, c) bikomponentní bod [67].....	68

Obr. 27: Zařízení pro nánosování tiskem [67]	69
Obr. 28: Schéma nánosovacího stroje – firma Villars [70].....	70
Obr. 29: Podlepvací stroj s kolmým přítlakem [70].....	72
Obr. 30: Laminovací a podlepvací stroj [71]	73
Obr. 31: Zpevnění nanovlákněné vrstvy z PI a filmu z PA6 [80]	74
Obr. 32: Schéma popisu tří základních kroků experimentu	76
Obr. 33: Přístroj Permetest	77
Obr. 34: Přístroj TEXTTEST AG 3300.....	77
Obr. 35: Schéma přístroje spray test	78
Obr. 36: Porovnávací stupnice hydrofobity podle etalonu.....	79
Obr. 37: Schéma uspořádání při měření úhlu smáčení [23].....	79
Obr. 38: Struktura netkané textilie Spunbond s plošnou hmotností 18 g/m ²	82
Obr. 39: Struktura netkané textilie Spunlace od firmy Dupond.....	83
Obr. 40: a) Neupravený vzorek 5 g/m ² b) Úprava silikonem b) Úprava fluorkarbonem.....	90
Obr. 41: Upravená nanovlákněná vrstva pomocí stříkání silikonu na povrch nanovláken....	100
Obr. 42: a) Neupravená nanovlákněná membrána 5 g/m ² b) Upravená nanovlákněná membrána	103
Obr. 43: Nánosovací stroj značky Caratsch [28].....	104
Obr. 44: Polymerní bod na podšívce vytvořený během nánosování	105
Obr. 45: Řez dvouvrstvým laminátem	106
Obr. 46: Řez 3-vrstvým laminátem	106
Obr. 47: Proniknutí adheziva PU, skrz celou nanovlákněnou vrstvu.....	113

Seznám tabulek

Tab. 1: Hodnotící tabulka výparného odporu.....	19
Tab. 2: Hodnoty produkce tělesných výparů podle intenzity zátěže.....	20
Tab. 3: Kritéria podobnosti	27
Tab. 4: Tabulka konstant pro vyjádření přirozené tepelné konvekce.....	27
Tab. 5: Přehled základních vrstev oblečení.....	34
Tab. 6: Výsledky kolísání plošné hmotnosti 1	85
Tab. 7: Výsledky kolísání plošné hmotnosti 2	85
Tab. 8: Výsledky kolísání plošné hmotnosti 3	86
Tab. 9: Porovnání průmyslově vyrobených vzorků Nanovia.....	87
Tab. 10: Porovnání komfortních vlastností upravené nanovlákněné vrstvy PA6 o plošné hmotnosti 5 g/m ²	91
Tab. 11: Porovnání komfortních vlastností upravené nanovlákněné vrstvy PA6 o plošné hmotnosti 1 g/m ² , Silikon.....	92
Tab. 12: Porovnání komfortních vlastností upravené nanovlákněné vrstvy PA6 o plošné hmotnosti 1 g/m ² , Fluorkarbon.....	93
Tab. 13: Porovnání komfortních vlastností upravené nanovlákněné vrstvy PU o plošné hmotnosti 1 g/m ²	94
Tab. 14: Porovnání komfortních vlastností upravené nanovlákněné vrstvy PU o plošné hmotnosti 5 g/m ² , Silikon	95
Tab. 15: Porovnání komfortních vlastností upravené nanovlákněné vrstvy PU o plošné hmotnosti 5 g/m ² , Fluorkarbon	96
Tab. 16: Mokrý přivažky na nanovlákněné vrstvě, chemický prostředek - silikon	97
Tab. 17: Vliv koncentrace a doby smočení na mokrý přivažek - polyamid.....	98
Tab. 18: Vliv koncentrace a doby smočení na mokrý přivažek - polyuretan.....	98
Tab. 19: Mokrý přivažky na nanovlákněné vrstvě, chemický prostředek - fluorcarbon.....	98
Tab. 20: Vliv koncentrace a doby smočení na mokrý přivažek - polyamid.....	98
Tab. 21: Vliv koncentrace a doby smočení na mokrý přivažek - polyuretan.....	99

Tab. 22: Vliv použité úpravy a koncentrace na prodyšnost, paropropustnost a hydrostatickou odolnost	100
Tab. 23: Vliv použité úpravy a koncentrace na prodyšnost, paropropustnost a hydrostatickou odolnost	101
Tab. 24: Výsledné hodnoty měření	103
Tab. 25: Statistické vyhodnocení výsledků	103
Tab. 26: Výsledky dvou a třívrstevných laminátů	108
Tab. 27: Výsledky měření nanovlákné vrstvy o plošné hmotnosti od 1 g/m ² do 5 g/m ² a 10 g/m ²	109
Tab. 28: Výsledky úpravy	111
Tab. 29: Výsledky měření dvou-vrstvého laminátu s hydrofobizovanou nanovláknou membránou	112
Tab. 30: Výsledky měření nanovlákné membrány s tkaninou PA/CO 50%/50%	113

Seznam publikací autora

Publikace v odborných časopisech

- [1] Knížek, R., Fridrichová, L., Miková, P., Bajzík, V., Polyurethane Coating on a Supporting Layer of Polymeric Nanofibers, *Book of proceedings 12th Autex World Textile Conference*, 2012, ISBN 9789537105488, published 2013.
- [2] Fridrichová, L., Zelová, K., Knížek, R., Influence of Structure of Material on Properties of Bending Rigidity and Creasing in Different Directions, *Advanced Science Letters*, Sv. 19, 2, stránky 384-387(4), 2013, ISSN: 19366612, published 2013.
- [3] Knizek, R., Wiener, J., Jirsak, O., Fridrichova, L., Bajzik, V., Hydrophobic Nanofiber Layers, *Advanced Science Letters*, stránky 605-608, Sv 19, 2, 2013. ISSN 1936-7317, published 2013.
- [4] Knizek, R., Karhankova, D., Bajzik, V., Protective Clouthing Using Nanofibers, *Advanced Materials Research*, Sv. 909, stránky 24-26, 2014. ISBN 978-3-03835-059-0, ISSN 1022-6680, published 2014.
- [5] Tereza, H., Vladimír, B., Roman, K., Zdeňka, G., Effect of the process of lamination microporous nanofiber membrane on the evaporative resistance of the two-layer laminate, *Advanced Materials Research*, Sv. 677, stránky 103-108, 2013, ISSN: 10226680, published 2014.

Příspěvek ve sborníku z konference

- [1] Knizek, R., Wiener, J., Jirsak, O., Microporous nanofibre membranes, Aachen Dresden international Textile conference, November 24-25, Aachen, 2011. ISSN 1867-6405.
- [2] Knizek, R., Miková, P., Wiener, J., Polyurethane Coating on a Layer of Nanofibers, 19th international conference STRUTEX, stránky 161-162, December 2012, ISBN 978-80-7372-913-4.
- [3] Knizek, R., Karhankova, D., Protective working dress using nanofibers, Aachen-Dresden International Textile Conference, Aachen 2013. ISSN 1867-6405.
- [4] Knizek, R., Karhankova, D., Creation and development of universal outer clothing for the city and sports with an emphasis on maintaining comfort properties, Scientific conference for Smart and functional textiles, Well-Being, Thermal comfort in clothing,

- Design, Thermal Manikins and Modelling Ambience14 Conference, Finsko, September 2014.
- [5] Knizek, R., Karhankova, D., Bajzik, V., Protection of Nanofiber Membranes with the help of Applying Dyes, stránky 216-219, *Book of proceedings of the 7th International Textile, Clothing & Design Conference–Magic World of Textiles*, ITC&DC – 7th International Textile, Clothing & Design Conference, Dubrovnik, 2014. ISSN 1847-7275. ISBN 978-953-7105-54-9.
- [6] Knizek, R., Karhankova, D., Fridrichova, L., Lamination Of Nanofiber Layer, CADME 2015: 17th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering, October, 11-12, Bali, Indonesia, 2015.
- [7] Knizek, R., Karhankova, D., Creation of Product Cards for Membrane Clothing Producers, Aachen-Dresden international Textile conference, Aachen, November 26-27, 2015. ISSN 1867-6405.

Odborná literatura

Knížek, R., Oděvy pro sportovní a outdoorové aktivity. Technická univerzita v Liberci. Liberec, 2013. 1. ISBN 978-80-7494-012-5.

Patenty a užité vzory

- [1] UV 24446, 2012-26069, Vrstva polymerních nanovláken se zvýšenou hydrostatickou odolností a vícevrstvý textilní kompozit obsahující alespoň jednu takovou vrstvu, 2012.
- [2] UV 24729, 2012-26942, Plošná vrstva polymerních nanovláken se zvýšenou hydrostatickou odolností a větruodolností, 2012.
- [3] UV 25682, 2012-27162, Textilní kompozit zejména pro outdoorové aplikace, 2013.
- [4] UV 26314, 2014-29687, Textilní kompozit, 2014.
- [5] UV 27438, 2014-29686, Zařízení pro výrobu nanovláken elektrostatickým zvlákňováním roztoku nebo taveniny polymeru, 2014.
- [6] UV 26314, 2013-28452, Jednorázový ochranný oděv, 2014.
- [7] P 2011-306, Způsob zvýšení hydrofobních vlastností plošné vrstvy polymerních nanovláken, vrstva polymerních nanovláken se zvýšenými hydrofobními vlastnostmi, a vrstvený textilní kompozit, který obsahuje takovou vrstvu, 2012.

- [8] P 305675, Způsob zvýšení hydrostatické odolnosti vrstvy polymerních nanovláken, vrstva polymerních nanovláken se zvýšenou hydrostatickou odolností, a vícevrstvý textilní kompozit obsahující alespoň jednu takovou vrstvu, 2013.
- [9] P 2012-895, Textilní kompozit zejména pro outdoorové aplikace, 2014.
- [10] P 2014-418 Způsob pro výrobu nanovláken elektrostatickým zvlákňováním roztoku nebo taveniny polymeru, a zařízení k jeho provádění, 2014
- [11] P 2015-163 Způsob pro výrobu textilního kompozitu zejména pro outdoorové aplikace, který obsahuje alespoň jednu vrstvu polymerních nanovláken, a tímto způsobem připravený textilní kompozit, 2015

Curriculum Vitae

Osobní údaje

JMÉNO A PŘÍJMENÍ	Ing. Roman Knížek
ADRESA	Svornosti 911/52, 463 11 Liberec
MOB.	+420 731 626 617
E-MAIL	roman.knizek@tul.cz

NÁRODNOST	česká
DATUM NAROZENÍ	25.3.1984
POHLAVÍ	mužské

Pracovní zkušenosti

DATUM	2010 - 2012
POZICE	středoškolský pedagog
ZAMĚSTNAVATEL	Střední škola gastronomie a služeb, Liberec

DATUM	2011 - současnost
POZICE	odborný asistent
ZAMĚSTNAVATEL	Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní

DATUM	2011 - 2013
POZICE	jednatel společnosti
ZAMĚSTNAVATEL	Viola Nanotechnology s.r.o.

DATUM	2012 - 2014
POZICE	jednatel společnosti
ZAMĚSTNAVATEL	Nanoprotex s.r.o.

DATUM	2015 - současnost
POZICE	ředitel pro výzkum a vývoj
ZAMĚSTNAVATEL	NANOMEMBRANE s.r.o.

Vzdělání a stáže

DATUM DOSAŽENÉ VZDĚLÁNÍ HLAVNÍ OBOR ORGANIZACE	2004 - 2008 bakalářské Textilní materiály a zkušebnictví Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní
DATUM DOSAŽENÉ VZDĚLÁNÍ HLAVNÍ OBOR ORGANIZACE	2008 - 2010 magisterské Textilní technologie Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní
DATUM DOSAŽENÉ VZDĚLÁNÍ HLAVNÍ OBOR ORGANIZACE	2010 - současnost studium Ph.D. - trvá Textilní inženýrství Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní
DATUM DÉLKA STÁŽE ORGANIZACE	2012 1 měsíc Georgia Institute of Technology, USA
DATUM DÉLKA STÁŽE ORGANIZACE	2013 1 měsíc Georgia Institute of Technology, USA
Zkušenosti a dovednosti	
HLAVNÍ JAZYK DALŠÍ JAZYKY	čeština angličtina
ODBORNÉ ZKUŠENOSTI A DOVEDNOSTI	Specializace na komfort textilií, vývoj a aplikace nanovlákných vrstev do oděvních výrobků, včetně ovládání měřicí techniky s tím spojené (hydrostatická odolnost, paropropustnost, prodyšnost, obrazová analýza, oděr atd.), spolupráce s výrobními podniky

Přílohy

Příloha č. 1: Statistická analýza vlivu konstrukce použitého materiálu
na komfortní vlastnosti

Tabulka Ia: Ověření dosažení předepsané plošné hmotnosti

Výrobce	Nanovia				Kertak			
	PU	PU	PA	PA	PU	PU	PA	PA
Jmenovitá Plošná hm. g.m ⁻²	1	5	1	5	1	5	1	5
Průměr	0,986	5,000	1,008	5,090	1,008	5,014	0,994	5,012
95%-ní IS	0,963- 1,008	4,954- 5,046	0,943- 1,073	4,997- 5,183	0,861- 1,154	4,817- 5,211	0,938- 1,050	4,801- 5,222
p	0,080	0,5	0,376	0,057	0,444	0,427	0,390	0,441
platnost hypotézy	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀

Z výsledků uvedených v tabulce IIIa plyne, že u všech vzorků bylo dosaženo předepsané plošné hmotnosti.

Tabulka Ib: Vliv použitého materiálu a plošné hmotnosti na prodyšnost – fy Nanovia

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Materiál	1	0,017	0,017	0,0351	0,854
Plošná hmotnost	1	1433,315	1433,315	2831,4048	<0,00001
Interakce	1	0,341	0,341	0,6872	0,419
Rezidua	16	7,930	0,496		
Celkem	19				

Tabulka Ic: Vliv použitého materiálu a plošné hmotnosti na prodyšnost – fy Kertak

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Materiál	1	0,392	0,392	1,57	0,228
Plošná hmotnost	1	355,830	355,830	1425,47	<0,00001
Interakce	1	1,947	1,947	7,80	0,013
Rezidua	16	3,994	0,250		
Celkem	19	362,163			

Tabulka Id: Vliv použitého materiálu a plošné hmotnosti na paropropustnost – fy Kertak

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Materiál	1	0,0008	0,0008	0,25	0,631
Plošná hmotnost	1	0,0075	0,0075	2,25	0,172
Interakce	1	0,0075	0,0075	2,25	0,172
Rezidua	8	0,0267	0,0033		
Celkem	11	0,0425			

Příloha č. 2: Statistická analýza dosažených výsledků

Tab. IIa: Vliv typu impregnace a koncentrace na prodyšnost, materiál: PA, plošná hmotnost 5 g/m², čas 1min

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Typ impregnace	1	6,496	6,496	3049,79	<0,00001
koncentrace	2	2,08	1,04	488,20	<0,00001
Interakce	2	0,654	0,327	153,45	<0,00001
Rezidua	24	0,051	0,00213		
Celkem	29	9,281			

Tab. IIb: Vliv typu impregnace a koncentrace na prodyšnost, materiál: PA, plošná hmotnost 5 g/m², čas 2min

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Typ impregnace	1	1,528	1,528	1218,96	<0,00001
koncentrace	2	0,764	0,382	305,00	<0,00001
Interakce	2	0,182	0,091	72,96	<0,00001
Rezidua	24	0,03	0,00125		
Celkem	29	2,504			

Tab. IIc: Vliv typu impregnace a koncentrace na paropropustnost, materiál: PA, plošná hmotnost 5 g/m², čas 1min

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Typ impregnace	1	0,514	0,514	333,94	<0,00001
koncentrace	2	0,762	0,381	247,14	<0,00001
Interakce	2	0,258	0,129	83,734	<0,00001
Rezidua	24	0,037	0,00154		
Celkem	29	1,57203			

Tab. IId: Vliv typu impregnace a koncentrace na paropropustnost, materiál: PA, plošná hmotnost 5 g/m², čas 2min

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Typ impregnace	1	0,129	0,129	31,69	<0,00001
koncentrace	2	0,279	0,1395	34,18	<0,00001
Interakce	2	0,005	0,0025	0,628	0,503
Rezidua	24	0,098	0,004		
Celkem	29	0,511			

Tab. IIe: Vliv typu impregnace a koncentrace na vodní sloupec, materiál: PA, plošná hmotnost 5 g/m^2 , čas 1min

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Typ impregnace	1	27,652	27,652	18033,91	<0,00001
koncentrace	2	26,672	13,336	8697,40	<0,00001
Interakce	2	7,532	3,766	2456,16	<0,00001
Rezidua	12	0,0184	0,0015		
Celkem	17	61,874			

Tab. IIe: Vliv typu impregnace a koncentrace na vodní sloupec, materiál: PA, plošná hmotnost 5 g/m^2 , čas 2min

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Typ impregnace	1	174,907	174,907	22155,75	<0,00001
koncentrace	2	23,459	11,729	1485,805	<0,00001
Interakce	2	4,0524	2,02623	256,666	<0,00001
Rezidua	12	0,0947	0,00789		
Celkem	17	202,513			

Tab. IIIa: Vliv typu impregnace a koncentrace na prodyšnost, materiál: PA, plošná hmotnost 1 g/m², čas 1min

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Typ impregnace	1	1,232	1,232	1004,52	<0,00001
koncentrace	2	12,624	6,3124	5146,01	<0,00001
Interakce	2	0,088	0,044	35,87	<0,00001
Rezidua	24	0,0294	0,0012		
Celkem	29	13,974			

Tab. IIIb: Vliv typu impregnace a koncentrace na prodyšnost, materiál: PA, plošná hmotnost 1g/m², čas 2min

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Typ impregnace	1	0,568	0,568	538,92	<0,00001
koncentrace	2	15,98	7,99	7573,46	<0,00001
Interakce	2	0,088	0,044	42,10	<0,00001
Rezidua	24	0,0253	0,00105		
Celkem	29	16,662			

Tab. IIIc: Vliv typu impregnace a koncentrace na paropropustnost, materiál: PA, plošná hmotnost 1g/m^2 , čas 1min

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Typ impregnace	1	0,267	0,267	80,57	<0,00001
koncentrace	2	1,179	0,589	177,92	<0,00001
Interakce	2	0,084	0,042	12,63	0,00018
Rezidua	24	0,0795	0,0033		
Celkem	29	1,609			

Tab. III d: Vliv typu impregnace a koncentrace na paropropustnost, materiál: PA, plošná hmotnost 1g/m^2 , čas 2min

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Typ impregnace	1	0,00075	0,00075	0,229	0,606
koncentrace	2	0,431	0,215	65,82	<0,00001
Interakce	2	0,0335	0,0167	5,12	0,014
Rezidua	24	0,0786	0,00328		
Celkem	29	0,5442			

Tab. IIIe: Vliv typu impregnace a koncentrace na vodní sloupec, materiál: PA, plošná hmotnost 1g/m^2 , čas 1min

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Typ impregnace	1	0,000556	0,00056	10	0,0082
koncentrace	2	0,03754	0,01877	337,9	<0,00001
Interakce	2	0,000078	0,000039	0,7	0,516
Rezidua	12	0,000667	0,000056		
Celkem	17	0,03884			

Tab. IIIf: Vliv typu impregnace a koncentrace na vodní sloupec, materiál: PA, plošná hmotnost 1g/m^2 , čas 2min

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Typ impregnace	1	0,0000056	0,0000056	0,056	0,818
koncentrace	2	0,0474	0,0237	237,17	<0,00001
Interakce	2	0,0000111	0,0000056	0,056	0,946
Rezidua	12	0,0012	0,0001		
Celkem	17	0,04865			

Tab. IVa: Vliv typu impregnace a koncentrace na prodyšnost, materiál: PU, plošná hmotnost 1g/m^2 , čas 1min

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Typ impregnace	1	0,0071	0,0071	1,42	0,246
koncentrace	2	6,345	3,172	637,07	<0,00001
Interakce	2	2,094	1,047	210,33	<0,00001
Rezidua	24	0,12	0,005		
Celkem	29	8,567			

Tab. IVb: Vliv typu impregnace a koncentrace na prodyšnost, materiál: PU, plošná hmotnost 1g/m^2 , čas 2min

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Typ impregnace	1	1,2	1,2	30,31	0,00001
koncentrace	2	9,467	4,733	119,55	<0,00001
Interakce	2	0,118	0,059	1,49	0,246
Rezidua	24	0,950	0,0396		
Celkem	29	11,735			

Tab. IVc: Vliv typu impregnace a koncentrace na paropropustnost, materiál: PU, plošná hmotnost 1g/m^2 , čas 1min

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Typ impregnace	1	1,149	1,149	345,086	<0,00001
koncentrace	2	0,962	0,481	144,44	<0,00001
Interakce	2	0,226	0,113	33,92	<0,00001
Rezidua	24	0,0799	0,0033		
Celkem	29	2,416			

Tab. IVd: Vliv typu impregnace a koncentrace na paropropustnost, materiál: PU, plošná hmotnost 1g/m^2 , čas 2min

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Typ impregnace	1	0,184	0,184	65,28	<0,00001
koncentrace	2	0,42	0,21	74,61	<0,00001
Interakce	2	0,0024	0,0012	0,43	0,626
Rezidua	24	0,0677	0,0028		
Celkem	29	0,675			

Tab. IVe: Vliv typu impregnace a koncentrace na vodní sloupec, materiál: PU, plošná hmotnost 1g/m^2 , čas 1min

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Typ impregnace	1	0,00642	0,0064	36,12	0,00006
koncentrace	2	0,0164	0,0082	46,16	<0,00001
Interakce	2	0,00274	0,00137	7,72	0,007
Rezidua	12	0,00213	0,00018		
Celkem	17	0,02771			

Tab. IVf: Vliv typu impregnace a koncentrace na vodní sloupec, materiál: PU, plošná hmotnost 1g/m^2 , čas 2min

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Typ impregnace	1	0,0024	0,0024	7,88	0,016
koncentrace	2	0,0254	0,0127	40,88	<0,00001
Interakce	2	0,00103	0,00052	1,66	0,231
Rezidua	12	0,00373	0,00031		
Celkem	17	0,03265			

Tab. Va: Vliv typu impregnace a koncentrace na prodyšnost, materiál: PU, plošná hmotnost 5 g/m², čas 1min

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Typ impregnace	1	2,436	2,436	2653,45	<0,00001
koncentrace	2	12,341	6,170	6719,28	<0,00001
Interakce	2	2,520	1,263	1372,08	<0,00001
Rezidua	24	0,022	0,00092		
Celkem	29	17,319			

Tab. Vb: Vliv typu impregnace a koncentrace na prodyšnost, materiál: PU, plošná hmotnost 5 g/m², čas 2min

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Typ impregnace	1	0,046	0,046	43,85	<0,00001
koncentrace	2	2,732	1,366	1291,17	<0,00001
Interakce	2	0,458	0,229	216,35	<0,00001
Rezidua	24	0,0254	0,0011		
Celkem	29	3,263			

Tab. Vc: Vliv typu impregnace a koncentrace na paropropustnost, materiál: PU, plošná hmotnost 5 g/m², čas 1min

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Typ impregnace	1	0,0032	0,0032	0,0253	0,864
koncentrace	2	3,625	1,812	14,3	0,00008
Interakce	2	2,874	1,437	11,34	0,00034
Rezidua	24	3,041	0,126		
Celkem	29	9,544			

Tab. Vd: Vliv typu impregnace a koncentrace na paropropustnost, materiál: PU, plošná hmotnost 5 g/m², čas 2min

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Typ impregnace	1	3,52233	3,522	690,03	<0,00001
koncentrace	2	1,568	0,784	153,65	<0,00001
Interakce	2	0,196	0,098	19,27	0,00001
Rezidua	24	0,1225	0,0051		
Celkem	29	5,410			

Tab. Ve: Vliv typu impregnace a koncentrace na vodní sloupec, materiál: PU, plošná hmotnost 5 g/m², čas 1min

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Typ impregnace	1	3,735	3,735	1608,61	<0,00001
koncentrace	2	8,901	4,450	1916,58	<0,00001
Interakce	2	1,369	0,684	294,86	<0,00001
Rezidua	12	0,0278	0,0023		
Celkem	17	14,034			

Tab. Vf: Vliv typu impregnace a koncentrace na vodní sloupec, materiál: PU, plošná hmotnost 5 g/m², čas 2min

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Typ impregnace	1	17,365	17,365	6722,20	<0,00001
koncentrace	2	4,793	2,396	927,8	<0,00001
Interakce	2	0,564	0,282	109,13	<0,00001
Rezidua	12	0,032	0,0025		
Celkem	17	22,754			

Tab. VIa: Vliv použité úpravy a koncentrace na prodyšnost

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
koncentrace	1	0,0411	0,0411	11,98	0,002
Doba smočení	2	22,087	11,044	3221,33	<0,00001
Interakce	2	0,609	0,305	88,84	<0,00001
Rezidua	24	0,082	0,0034		
Celkem	29	22,820			

Tab. VIb: Vliv použité úpravy a koncentrace na paropropustnost

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
koncentrace	1	2,465	2,465	295,84	<0,00001
Doba smočení	2	7,153	3,576	429,16	<0,00001
Interakce	2	0,420	0,210	25,24	<0,00001
Rezidua	24	0,2	0,0083		
Celkem	29	10,238			

Tab. VIc: Vliv použité úpravy a koncentrace na vodní sloupec

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
koncentrace	1	0,0047	0,0047	0,0599	0,811
Doba smočení	2	131,411	65,705	842,98	<0,00001
Interakce	2	1,206	0,603	7,74	0,007
Rezidua	12	0,935	0,078		
Celkem	17	133,56			

Tab. VIIa: Vliv použité úpravy a koncentrace na prodyšnost

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Koncentrace	1	0,4890	0,4890	15,10	0,0007
Doba smočení	2	1,579	0,789	24,39	<0,00001
Interakce	2	0,5780	0,2890	8,92	0,001
Rezidua	24	0,777	0,0323		
Celkem	29	3,423			

Tab. VIIb: Vliv použité úpravy a koncentrace na paropropustnost

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
Koncentrace	1	0,208	0,208	14,04	0,001
Doba smočení	2	10,844	5,422	365,55	<0,00001
Interakce	2	0,0646	0,0323	2,17	0,135
Rezidua	24	0,356	0,0148		
Celkem	29	11,473			

Tab. VIIc: Vliv použité úpravy a koncentrace na vodní sloupec

Zdroj variability	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F kritérium	Hodnota p
koncentrace	1	0,0249	0,0249	3,08	0,104
Doba smočení	2	1,13	0,565	69,9	<0,00001
Interakce	2	0,2241	0,1121	13,87	0,0008
Rezidua	12	0,097	0,008		
Celkem	17	1,476			

Tab. XIIIa: Výsledky dvou a třívrstevných laminátů - prodyšnost

	Dvouvrstvý laminát		Třívrstvý laminát	
	Interlana	Lacom	Interlana	Lacom
Rozptyly	0,00322	0,003	0,001	0,0019
p	0,473		0,287	
Platnost Hypotézy	H ₀		H ₀	
Průměr	2,038	2,04	1,6	1,578
p	0,956		0,393	
Platnost Hypotézy	H ₀		H ₀	

Tab. XIIIb: Výsledky dvou a třívrstevných laminátů - paropropustnost

	Dvouvrstvý laminát		Třívrstvý laminát	
	Interlana	Lacom	Interlana	Lacom
Rozptyly	0,0033	0,0033	0,0033	0,0033
p	0,5		0,5	
Platnost Hypotézy	H ₀		H ₀	
Průměr	1,33	1,33	2,37	2,33
p	1		0,519	
Platnost Hypotézy	H ₀		H ₀	

Tab. XIIIc: Výsledky dvou a třívrstevných laminátů - vodní sloupec

	Dvouvrstvý laminát		Třívrstvý laminát	
	Interlana	Lacom	Interlana	Lacom
Rozptyly	0,01	0,043	0,013	0,103
p	0,188		0,114	
Platnost Hypotézy	H ₀		H ₀	
Průměr	17	17,27	16,93	17,13
p	0,116		0,368	
Platnost Hypotézy	H ₀		H ₀	

Příloha č. 3: Protokol z Hohenstein institute

Hohenstein Laboratories • Schloss Hohenstein • 74357 Bönnigheim

Technical University of Liberec

Mr Roman Knížek

Studentska 1402/2

46117 LIBEREC 1

CZECH REPUBLIC

Hohenstein Laboratories

GmbH & Co. KG

Schloss Hohenstein

74357 Bönnigheim • Germany

Function and Care

Telefon / Phone +49 7143 271 618

A.Haemmerle@hohenstein.de

Kundennr. / Client no.	Zuständig für Rückfragen / Contact person	Unser Zeichen / Our ref.	Datum / Date
	Haemmerle, Anja	Aha	28. September 2015

Prüfbericht Nr. / Test report no. 15.1.11.0354

Auftraggeber / Client:	Siehe Anschrift / see address
Ansprechpartner / Contact person:	Roman Knížek
Auftragsdatum / Date of order:	21.09.2015
Auftragseingang / Receipt of order:	21.09.2015
Materialeingang / Receipt of material:	21.09.2015
Untersuchungsgut / Test sample:	2/3-Lagen-Laminat 2/3-layer laminate
Prüfzeitraum / Period of testing:	21.09.2015 bis / to 28.09.2015
Untersuchungsziel / Aim of test:	Measurement of water vapour resistance Measurement of water vapour resistance
Probenahme / Sampling:	Der Prüfgegenstand wurde uns vom Auftraggeber übersandt. The test sample has been delivered to us by the client.

Der Prüfbericht umfasst 3 Seiten. / The test report comprises 3 pages.

Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren - im Bericht mit "gekennzeichnet" gekennzeichnet.
The accreditation applies for the test methods listed in the certificate - marked "in the report".



Gründungsmitglied der Internationalen Prüfgemeinschaft für angewandten UV-Schutz (UV Standard 801)

Es gelten unsere Allgemeinen Geschäftsbedingungen:
www.hohenstein.de/pdf/agb.pdf
Our terms of business shall apply:
www.hohenstein.de/pdf/agb_e.pdf

Telefon / Phone
+49 7143 271 0
Fax +49 7143 271 51
info@hohenstein.de
www.hohenstein.de

UST-IdNr.
VAT REG No.
DE815128169

Hohenstein Laboratories GmbH & Co. KG • Registergericht: Amtsgericht Stuttgart HRA 724658 •
Persönlich haftender Gesellschafter: Hohenstein Verwaltungs GmbH HRB 752904 •
Sitz der Gesellschaft ist Bönnigheim • Geschäftsführer: Dr. Stefan Droste, Florian Girmond, Prof. Dr. Dirk Höfer, Dr. Andreas Schmidt
Hohenstein Laboratories GmbH & Co. KG • Court of Registration County Stuttgart HRA 724658 •
personally liable associate: Hohenstein Verwaltungs GmbH HRB 752904 •
company headquarter is Boennigheim • Managing Directors: Dr. Stefan Droste, Florian Girmond,
Prof. Dr. Dirk Höfer, Dr. Andreas Schmidt

PRÜFGEGENSTAND / TEST SAMPLES

Probennr. / Sample n°	Prüfgegenstand / Test sample
15.1.11.0354 -1	3-Lagen-Laminat, 30L-20-008-051, rot/schwarz 3-layer laminate 30L-20-008-051, red/black
15.1.11.0354 -2	2-Lagen-Laminat, 20L-20-008, rot/weiß 2-layer laminate 20L-20-008, red/white
Anmerkung: Note:	Bei den Messungen wies die schwarze bzw. weiße Seite des Musters nach innen zur Messfläche des Hautmodells. In the test the black resp. white side of the sample was facing inwards toward the Skin Model's measuring plate.

ERGEBNIS / RESULT

Wasserdampfdurchgangswiderstand - Water vapour resistance R_{et} (m²Pa/W):

Prüfgerät: Thermoregulationsmodell der menschlichen Haut (Hautmodell)

Prüfbedingungen: s. DIN EN ISO 11092:2014-12^A

Prüfklima: $T_a = 35^\circ\text{C}$; $\phi_a = 40\%$ r.F.

Mittel aus 3 Einzelmessungen an 3 (verschiedenen) Probenabschnitt(en) von Muster 15.1.11.0354-1

Mittel aus 3 Einzelmessungen an 3 (verschiedenen) Probenabschnitt(en) von Muster 15.1.11.0354-2

Apparatus: Hohenstein Skin Model

Test conditions: according to EN ISO 11092:2014-12^A

Test climate: $T_a = 35^\circ\text{C}$; $\phi_a = 40\%$ r.h.

Mean value of 3 single measurements with 3 (different) specimen item(s) of sample 15.1.11.0354-1

Mean value of 3 single measurements with 3 (different) specimen item(s) of sample 15.1.11.0354-2

Muster sample	Wasserdampfdurchgangswiderstand water vapour resistance R_{et} m ² Pa/W
15.1.11.0354-1	3,85
15.1.11.0354-2	0,89

Geschäftsführer
Managing Director

Dr. Andreas Schmidt



Die Leiterin des Labors
Bekleidungsphysiologie
Head of the Laboratory of
Clothing Physiology

Silke Off

"The translation was carried out to the best of a non-native speaker's knowledge. Liability cannot be taken."

Das Ergebnis bezieht sich nur auf die eingereichten Prüfgegenstände. Der Bericht darf nicht auszugsweise, sondern nur in seinem vollen Umfang weitergegeben werden. Eine Benutzung des Berichts zu Werbezwecken oder die Veröffentlichung freier Interpretationen der Ergebnisse ist nur mit ausdrücklicher Genehmigung der Hohenstein Institute zulässig. Rechtsverbindlich ist der im Original unterschriebene Bericht. Die vom Kunden übergebenen Unterlagen bzw. Materialien, insbesondere Prüfgegenstände, werden, soweit die Beschaffenheit dies zulässt, 3 Monate bei uns aufbewahrt. Für den gesetzlich geregelten Bereich der Persönlichen Schutzausrüstung gilt eine Aufbewahrungsfrist von 10 Jahren.

The results relate only to the test samples submitted. This report must only be reproduced in full and not in extract form. Use of the report in advertising or the publication of free interpretations of the results is only allowed with the express permission of the Hohenstein Institute. Only the signed original report is legally binding. Documents and materials delivered by the client, especially test samples, will be retained by us for 3 months, provided their condition allows it. For Personal Protective Equipment (PPE), which is regulated by law, a retention period of 10 years is applicable.