

Kombinace známých vláknenných technik pro vytvoření vhodného nosného materiálu pro sorbenty

Diplomová práce

Studijní program: N3106 - Textilní inženýrství

Studijní obor: 3106T018 - Netkané a nanovláknenné materiály

Autor práce: **Bc. Ivan Ulman**

Vedoucí práce: Ing. Radek Jirkovec



Combination of known fibrous techniques to form a suitable material for sorbent support

Diploma thesis

Study programme: N3106 – Textile Engineering

Study branch: 3106T018 – Nonwoven and nanofibers materials

Auhtor: **Bc. Ivan Ulman**

Supervisor: Ing. Radek Jirkovec



Zadání diplomové práce

Kombinace známých vláknenných technik pro vytvoření vhodného nosného materiálu pro sorbenty

Jméno a příjmení: **Bc. Ivan Ulman**
Osobní číslo: T1500013
Studijní program: N3106 Textilní inženýrství
Studijní obor: Netkané a nanovláknenné materiály
Zadávající katedra: Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů
Akademický rok: **2017/2018**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování rešerše na téma: sorbenty, vláknenné techniky, vláknenné kompozitní materiály.
2. Navržení technologického procesu směsování vláken a vnášení částic sorbentu.
3. Experimentální část: příprava vláknenných struktur, kompozitního materiálu, vnášení práškového sorbentu.
4. Analýza vyrobených vláknenných vrstev textilními metodami.
5. Zpracování výsledků a závěr.



Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:

dle potřeby dokumentace
30-40 dle potřeby
tištěná/elektronická



Seznam odborné literatury:

- 1) Russell, S. Handbook of Nonwovens, Woodhead Publishing 2007. ISBN:978-1-85573-603-0.
- 2) Wypych, G. Handbook of Polymers, 2011th ed.; ChemTec Publishing, 2011. ISBN: 978-1-895198-47-8.
- 3) Gupta, K. R. Polymer Nanocomposites Handbook, CRC Press 2009. ISBN: 978-0849397776.
- 4) Campbell, C. F. Manufacturing Process for Advanced Composites, Elsevier Science 2003. ISBN: 978-1-85617-415-2.
- 5) Tušek, D.; et. al. Environmentally acceptable sorbents of chemical warfare agent simulants. Journal of Materials Science, March 2017, vol. 52, no.5, p. 2561-2604.

Vedoucí práce:

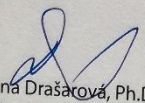
Ing. Radek Jirkovec
Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů

Datum zadání práce:

20. února 2018

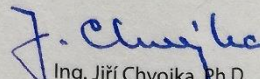
Předpokládaný termín odevzdání:

18. dubna 2019


Ing. Jana Drašarová, Ph.D.
děkanka

V Liberci 20. února 2018




Ing. Jiří Chvojka, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

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

Užiji-li diplomovou 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.

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

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

Datum:

Podpis:

Poděkování

Velice děkuji Ing. Radku Jirkovcovi, vedoucímu mé diplomové práce, za jeho čas, pomoc, vedení a za jeho rady při praktické i teoretické části. Dále bych rád poděkoval Ing. Jiřímu Chvojkovi, PhD. za jeho konzultace a Ing. Janě Hlavaté za pořizování snímků na snímacím elektronovém mikroskopu. Další díky patří kolektivu katedry netkaných textilií za pomoc při měřeních a konzultacích. Nesmím opomenout poděkovat celému týmu ve Státním ústavu jaderné, chemické a biologické obrany v Brně, především panu Mgr. Jakubu Vaňkovi, PhD. a Ing. Jiřímu Slabotinskému, CSc.

Největší díky však patří mé rodině, která při mně stála celou dobu studia a plně mě podporovala, ať už finančně nebo psychicky. Zvláštní poděkování bych potom rád věnoval kamarádce Ing. Šárce Hauzerové, jež se mnou konzultovala každou mou myšlenku.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem a výrobou kompozitního materiálu s inkorporací sorbentu-aktivního uhlí, které je naprašováno na netkaný materiál. Finální produkt je potom složen z několika vrstev - spunbondu, netkané textilie s aktivním uhlím a nanovláken vyrobených technologií AC spinning. Zabývá se především návrhem vrstev způsobem naprášení aktivního uhlí a zpevněním hotových kompozitů. Hotový materiál

je nakonec podroben několika zkouškám jako je prodyšnost, paropropustnost, úbytek částic aktivního uhlí a průchod chemických bojových látek. Výsledný materiál je porovnáván s armádním oblečením FOP-96. Finální produkt by měl sloužit jako ochranná vrstva pro vojenské účely a možné filtrační produkty.

KLÍČOVÁ SLOVA

Chemické bojové látky, vojenské oblečení, paropropustnost, nanovlákna, aktivní uhlí

Abstract

The diploma thesis deals with design and production of composite material with the incorporation of sorbent-activated carbon, which is sputtered on nonwoven material. The final product is then composed of several layers - spunbond, nonwoven textile with activated carbon and nanofibers produced by AC spinning technology. It mainly deals with the design of layers, the method how to incorporate activated carbon and the bonding of

finished composites. The finished material is finally subjected to several tests, such as breathability, vapor permeability, decrease of activated carbon particles and penetration of chemical warfare agents. The resulting material is compared with FOP-96 military clothing. The final product should serve as a protective layer for military purposes and possible filtration products.

THE KEY WORDS

chemical warfare agents, army clothing, vapor permeability, nanofibers, activated carbon

Obsah

Úvod.....	14
1 Rešeršní část.....	15
2 Teoretická část.....	18
2.1 Technologie pro výrobu netkaných vlákných vrstev	18
2.1.1 Mykání.....	18
2.1.2 Technologie spunbond.....	19
2.1.2.1 Bikomponentní vlákna.....	21
2.1.3 Technologie meltblown	22
2.1.4 Odstředivé zvlákňování	23
2.1.5 Výroba nanovláken za pomoci zdroje napětí	25
2.1.5.1 Stejnoseměrné zvlákňování	25
2.1.5.2 Střídané zvlákňování.....	27
2.2 Pojení netkaných textilií	30
2.2.1 Šití.....	30
2.2.2 Lisování za tepla.....	31
2.2.3 Laminace	32
2.2.4 Hot-melt.....	33
2.2.5 Ultrazvuk	34
2.3 Aktivní uhlí (AU).....	35
2.4 Testování netkaných textilií.....	37
2.4.1 Prodyšnost	37
2.4.2 Permetest	38
2.4.3 Jodotest.....	39
2.4.4 Test odolnosti materiálu vůči kapkám Somanu.....	40
2.4.5 Metodika Carousel.....	41
3 Praktická část.....	42
3.1 Odstředivé zvlákňování	42
3.2 Kombinace technologií meltblownu a AC zvlákňování.....	44
3.2.1 Morfologie kompozitní vrstvy z AC zvlákňování a meltblownu.....	48

3.3	Kombinace dostupných vlákenných materiálů	52
3.4	Výroba kompozitních materiálů s inkorporací aktivního uhlí	55
3.4.1	Výroba laminovaných vrstev	55
3.4.2	Výroba vrstev spojených jinými technologiemi	58
3.5	Morfologie vlákenných materiálů a částic aktivního uhlí	61
3.6	Testování vyrobených vzorků.....	64
3.6.1	Statická zkouška úbytku částic aktivního uhlí.....	64
3.6.2	Dynamická zkouška úbytku částic aktivního uhlí	65
3.6.3	Prodyšnost	66
3.6.3.1	Závislost prodyšnosti na množství aktivního uhlí	67
3.6.4	Paropropustnost	68
3.6.4.1	Závislost paropropustnosti na množství aktivního uhlí	70
3.6.5	Odolnost vzorků proti pronikání bojových chemických látek	71
3.6.5.1	Odolnosti vzorků proti pronikání jódu.....	72
3.6.5.2	Odolnosti vzorků proti pronikání dimethyl methylfosfonátu (DMMP).....	74
3.6.5.3	Odolnosti vzorků proti pronikání Somanu (GD)	75
3.6.5.4	Odolnosti vzorků proti pronikání 1,6-dichlorhexanu (DCH)	76
3.6.5.5	Odolnosti vzorků proti pronikání Yperitu.....	77
3.6.5.6	Odolnosti vzorků Polyester a Polypropylen proti pronikání jódu	78
3.7	Analýza armádního obleku typu FOP-96	79
4	Diskuze	82
5	Závěr.....	86
	Literatura	87
	Seznam obrázků	93
	Seznam tabulek.....	96

Seznam označení

Zkratka	Název
CBRN	chemická, biologická, radiologická a nukleární obrana
PE	polyetylen
PP	polypropylen
DC	zvlákňování stejnosměrným proudem
AC	zvlákňování střídavým proudem
PVB	polyvinylbutyral
PAN	polyakrylonitril
MFI	Melt Flow Index – Index toku taveniny
AU	aktivní uhlí
CHSK	chemická spotřeba kyslíku
CWA	chemical warfare agents – chemické bojové látky
PA 6	polyamid 6
PS	polystyren
PCL	polycaprolacton
PVDF	polyvinyliden fluorid
SB	spunbond
MB	meltblown
VP	mykaná textilie zpevněná vpichováním
SVP	struto vlákenná vrstva zpevněná vpichováním
SÚJCHBO	státní ústav pro jadernou, chemickou a biologickou obranu
DMMP	dimethyl methylfosfonát
DCH	1,6-dichlorhexan
GD	Soman
GB	Sarin
I	jód
FOP-96	typ armádního obleku

R	prodyšnost
Q_v	objemové množství protečené tekutiny
A	plocha vzorku, kterou prochází vzduch
k	koeficient převodu jednotek
q_o	tepelný tok
p	relativní propustnost pro vodní páry
q_v	hodnota odporu měřeného vzorku
P_m	parciální tlak nasycené vodní páry pro okolní teplotu
P_a	skutečný parciální tlak vodních par v laboratoři
nm	nanometr
μm	mikrometr
mm	milimetr
cm	centimetr
kV	kiloVolt
Hz/kHZ	Hertz/kiloHertz
$^{\circ}\text{C}$	stupeň Celsia
g	gram
min	minuta
s	sekunda
T	teplota
m^2	metr čtvereční
Pa	Pascal
N	Newton
$\text{Pa}\cdot\text{m}^2/\text{W}$	Pascal krát metr čtvereční na Watt
Tex	jednotka jemnosti
g/mol	gram na mol
$\text{l}/\text{m}^2/\text{s}$	litr na metr čtvereční za sekundu
m/min	metrů za minutu
mg/g	miligramy na gram
$\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}$	mikrogram na centimetr čtvereční za minutu

Úvod

Cílem diplomové práce bylo vyrobit vhodné kompozitní vrstvy pro inkorporaci sorbentu pro filtrační účely. Finální vrstvy jsou zhotoveny z netkané textilie zpevněné vpichováním, do které jsou inkorporovány částice aktivního uhlí jako sorbentu. Tato funkční vrstva je potom opatřena proti úniku částic aktivního uhlí pomocí nanovláken, chráněných mykanými vpichovanými vrstvami a spunbond textiliemi. Kompozitní materiál byl primárně vyráběn s cílem nahradit nynější armádní oděvy používané pro pohyb v bojových podmínkách při případném použití chemických bojových látek.

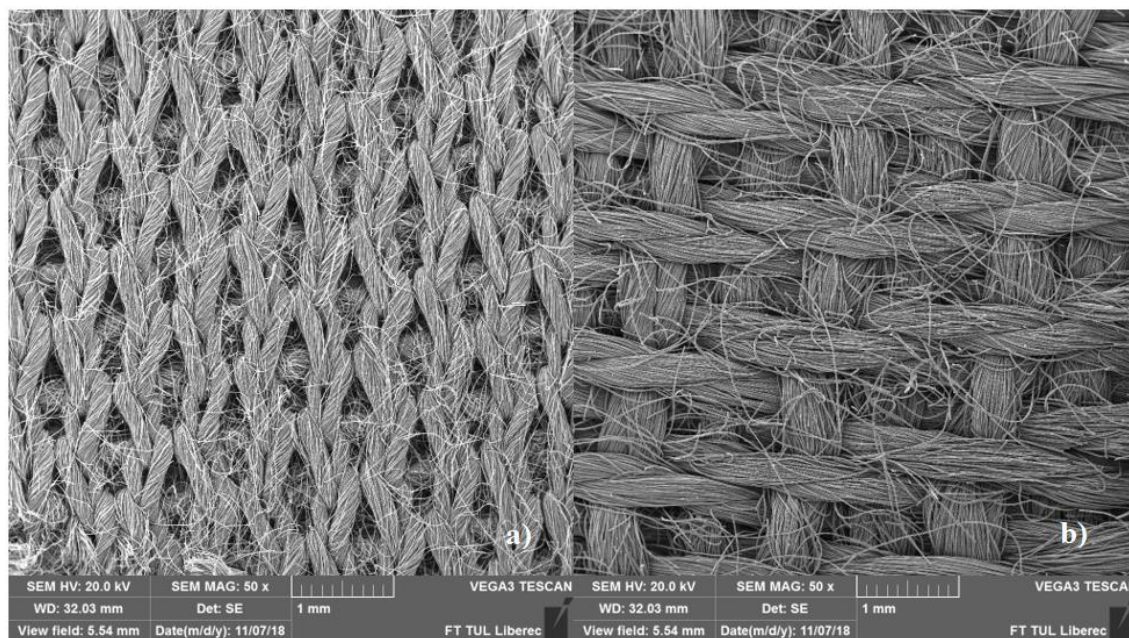
Rešeršní část se zabývá vydanými patenty a články, které pojednávají o použití aktivního uhlí pro sorpci škodlivých látek. Prvními zmíněnými materiály jsou tkaniny a pleteniny z vláken aktivního uhlí od světoznámé společnosti Chemviron. Dalším podkladem byla bakalářská práce s názvem „Vývoj nanovlákných kompozitních materiálů s inkorporovaným aktivním uhlím pro filtrační účely“, která se ve své rešeršní části odkazuje na vydané studie s ohledem na filtraci za pomoci aktivního uhlí, ať už je to jeho využití pro čištění vod nebo v patentech pro výrobu armádního oblečení. Samotná bakalářská práce potom také pojednává o výrobě vrstev pro filtrační účely s případným použitím pro armádní účely.

Teoretická část popisuje technologické postupy používané pro výrobu a pojení netkaných textilií, a testování pro jejich specifikaci vlastností, použité v rámci diplomové práce.

Experimentální část se zabývá samotnou výrobou vzorků, které byly produkovány s odlišným přístupem k výrobě. Dále je popsáno vnášení aktivního uhlí do netkaného materiálu s cílem rovnoměrnějšího rozložení jeho částic. V rámci praktické části došlo k vyhodnocení vyrobených vzorků za pomoci testů na prodyšnost, paropropustnost a úbytek částic aktivního uhlí. Vybrané vzorky byly odesílány do státního ústavu jaderné, chemické a biologické obrany v Brně, kde byly měřeny na průnik nebezpečných látek a jejich náhrad. Závěr praktické části patří porovnání vyrobených vzorků s materiálem používaným v armádním oblečení typu FOP-96.

1 Rešeršní část

S vývojem dnešního světa jde ruku v ruce i vývoj filtračních médií, které se dají použít nejen do průmyslových filtračních zařízení ale i do oblečení armádních příslušníků chemické, biologické, radiační a nukleární obrany (dále jen CBRN). Jedna z firem, která se touto problematikou zabývá je firma Chemviron, dceřiná společnost společnosti Calgon Carbon, jejíž kořeny sahají až do roku 1942. Tehdy se firma Pittsburgh Coke & Chemical Company Inc. stala průkopníkem vývoje granulovaného aktivního uhlí ve vojenské ochraně, v roce 1965 byla společností Calgon Carbon odkoupena. Společnost Chemviron je ve světovém měřítku lídrem výroby tkaných a pletených materiálů z vláken aktivního uhlí, označované názvem Flexzorb, směřované jak do lékařských, tak i vojenských či průmyslových aplikací. Původně byly Flexzorb tkaniny (Obrázek 1 b) a pleteniny (Obrázek 1 a) speciálně navrženy pro ministerstvo obrany Velké Británie. Flexzorb může být pro získání ještě lepších vlastností laminován i na jiné vrstvy tkaných, pletených a netkaných materiálů, například pro zvýšení odolnosti materiálu v tahu, otěru, snížení hořlavosti, nebo může být impregnován vrstvou proti kapalným činidlům, a to vše se zachováním prodyšnosti a zajištěním komfortu i v horkém podnebí [1,2].

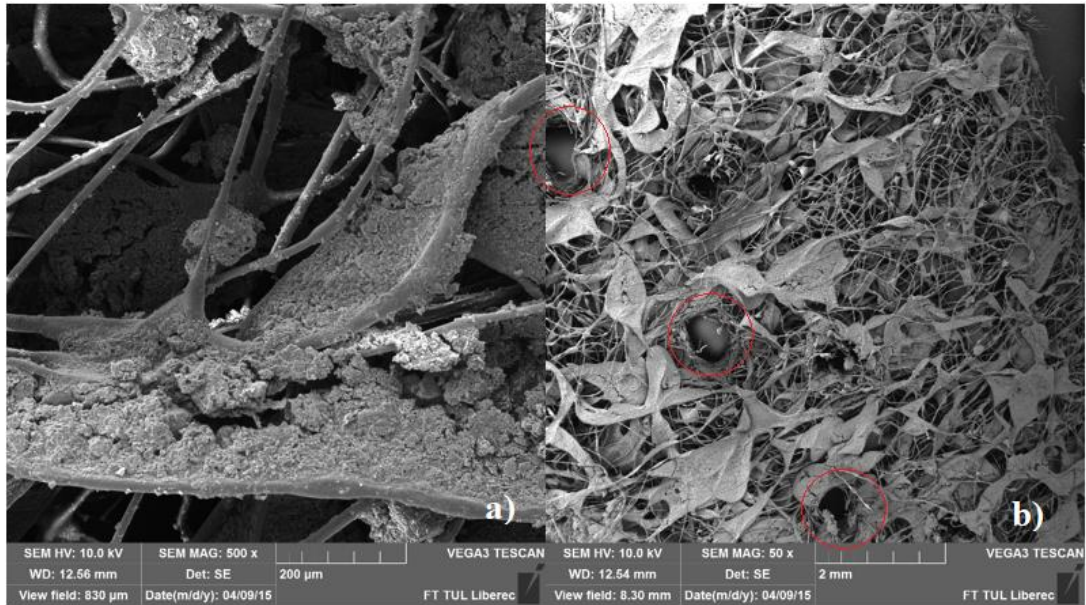


Obrázek 1: Snímek Flexzorb pleteniny (a) a tkaniny (b) z elektronového mikroskopu při zvětšení 50x (měřítko 1 mm)

CBRN problematice se také věnovala bakalářská práce s názvem „Vývoj nanovlákných kompozitních materiálů s inkorporovaným aktivním uhlím pro filtrační účely“. Tato bakalářská práce se v rešeršní části odkazuje na odborný článek s názvem „Removal of micropollutants and reduction of biological activity in a full scale reclamation plant using ozonation and activated carbon filtration“, zabývajícího se šestifázovým čištěním odpadních vod, do kterého je v předposlední fázi zahrnuto aktivní uhlí pro svou velkou efektivitu absorpce zbylých mikropolutantů a rozpuštěného organického uhlí.

Dále vychází z patentu z roku 1986 na výrobu sorpčních filtrů a ochranných oděvů, napsaný Gigliou a jeho spolupracovníkem Battistellim, s názvem „Non-woven activated carbon fabric“. Patent obsahuje návrh na filtry vyráběné z netkaných textilií a aktivního uhlí. Podstata vynálezu spočívá v materiálu obsahující částice či vlákna aktivního uhlí, vyráběné mokrou cestou – naplavováním, podobně jako se vyrábí papír. Pojivem pro netkaný materiál s aktivním uhlím byla akrylová vlákna. Celý filtr je potom možné dále laminovat lepidly ve formě pěn, akrylovými latexy nebo polyuretany. S množstvím použitého pojiva pro zabránění uvolnění částic aktivního uhlí je ochranný oděv málo prodyšný, navíc je svojí konstrukcí zbytečně těžký. Patent byl pro výrobu uznán a v trošku pozměněné formě využíván dodnes.

Posledním článkem, z kterého bakalářská práce čerpala, byl článek s názvem „Development of chemical protective clothing“, který vycházel a navazoval na patent Giglii a jeho spolupracovníka Battistelliho. Patent byl těmito dvěma vědci vylepšen rovnou o několik vrstev. První vrstva je tvořena z bavlněných či umělých vláken, pokrytou voděodolným zátěrem. Druhá a čtvrtá vrstva je tvořena z netkaného vpichováním zpevněného materiálu, mezi kterými je vrstva aktivního uhlí s pojivem pro zabránění jeho úniku. Pátou vrstvou je podšívkový materiál z bavlny pro zvýšení komfortu při nošení. Pojivem pro aktivní uhlí je použita polyuretanová pěna nebo polyuretanové lepidlo. Použitím pojiva byl tento ochranný oděv málo prodyšný (Obrázek 2 Snímky vrstvy s aktivním uhlím používané v armádní bundě: a) pojivo s aktivním uhlím se zvětšením 500x, b) průniky po vpichování, zvětšené 50x, převzato z [3]. a), proto byly vyrobeny selektivně propustné membrány, kterými došlo ke zlepšení prodyšnosti. Výroba byla však velice nákladná, a proto byly nahrazeny již zmíněným vpichováním. Vpichováním vzniknou po průchodu jehly větší průduchy (póry), které zlepšují proudění vzduchu (Obrázek 2 b) [3].



Obrázek 2: Snímky vrstvy s aktivním uhlím používané v armádní bundě: a) pojivo s aktivním uhlím se zvětšením 500x, b) průniky po vpichování, zvětšené 50x, převzato z [3].

Samotná bakalářská práce referuje o výrobě několika sérií vzorků s použitím aktivního uhlí jako nosného sorbentu proti bojovým plynům. Vzorky byly vyrobeny z podkladového netkaného materiálu typu spunbond, na který byla nejprve zvlákněna nanovlákna, a potom na ně bylo pomocí vibračního dávkovače nasypáváno aktivní uhlí, které bylo také následně povrstveno nanovlákny pro zamezení sesypání a úniku jeho částic mimo textilii. Vyrobené vzorky byly finálně pojeny pomocí laminace na stroji RPS mini od německé firmy Meyer. Právě laminací byly zaslepeny póry aktivního uhlí, což mělo za následek zmenšení měrného povrchu a snížení jeho účinnosti. Laminace vzorků také ve veliké míře snižovala porozitu nanovlákněné vrstvy a zabraňovala tak průchodu vzduchu. Nejen kvůli laminaci, ale i nízké objemové hustotě, nebyly vzorky uvedeny do průmyslové výroby [3].

2 Teoretická část

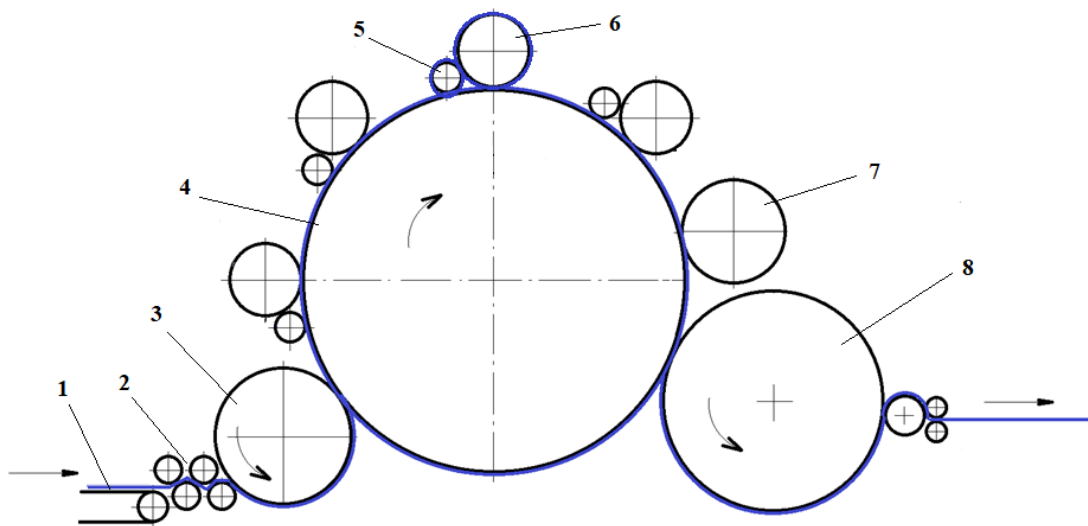
Teoretická část je zaměřena na seznámení s jednotlivými technologiemi a materiály, které byly použity při výzkumu se zaměřením na diplomovou práci, a které zásadně ovlivnily jeho průběh.

2.1 Technologie pro výrobu netkaných vláknenných vrstev

Kapitola shrnuje známé technologické procesy pro výrobu netkaných textilií. Podkapitoly jsou řazeny s ohledem na průměr vlákna finálního produktu, a jsou řazeny od největšího průměru po nejmenší průměr vlákna přiváděného nebo vyráběného vláknenného materiálu, kde se dostáváme až na velikost nanometrů.

2.1.1 Mykání

Mykání se řadí do mechanických způsobů výroby netkaných vláknenných vrstev suchou cestou, je jedním z nejrozšířenějších způsobů výroby netkaných textilií. Samotný princip spočívá v ojednocení vláken, jejich promísění, částečném napřímění a urovnání vláken do podélného směru. Úkolem je také zvýšit homogenitu materiálu a vyrobit tak vrstvu se stejnoměrnou plošnou hmotností [4].

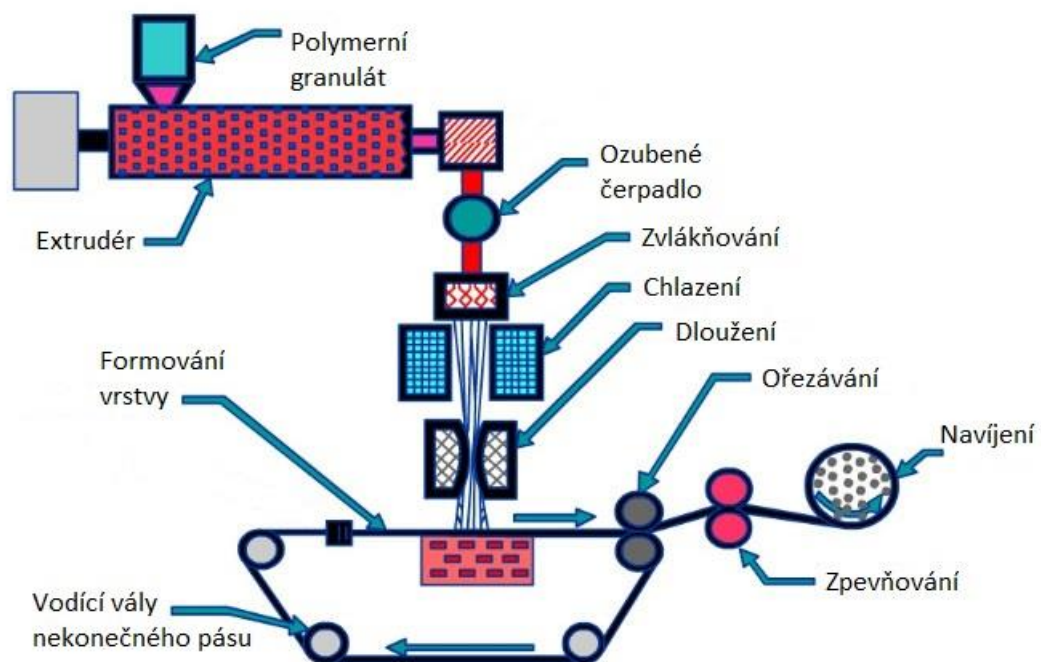


Obrázek 3: Schéma mykacího stroje: 1-dopravní pás, 2-podávací válečky, 3-rozvolňovací válec, 4-tambur, 5-obrabeč, 6-pracovní válec, 7-volant, 8-snímání válec

Schéma mykacího stroje je znázorněno na obrázku 3. Již částečně rozvolněný materiál je v podobě chomáček vláken ukládán na dopravní pás, který zásobuje podávací zařízení stroje. Rozvolňovací válec potom snímá vlákenný materiál z podávacího ústrojí a přivádí jej k tamburu (hlavnímu válci), část vláken je z tamburu zachycena pracovním válcem, který je přenáší na obraceč. Z obraceče jsou vlákna následně opět odstraněna hlavním válcem. Právě tomuto samotnému procesu se říká mykání a činnost se podle počtu párů pracovního a snímacího válce několikrát opakuje. Po průchodu pracovním ústrojím stroje se vlákenný materiál dostává k volantu, jenž vlákenný materiál vyzdvihne ke snímacímu válci, z kterého jsou sčesávána sčesávacím hřebenem na dopravníkový pás [4].

2.1.2 Technologie spunbond

Název technologie spunbond je odvozen z podstaty výrobního procesu, tedy zvlákňování polymeru (zvlákňování-spun) a jeho pojení (pojit-bond). V češtině se zpravidla používá označení Spunbond nebo také “výroba pod hubicí“.



Obrázek 4: Schematické znázornění procesu technologie spunbond [5]

Výrobní proces technologie spunbond, znázorněn na obrázku 4, spočívá ve zvlákňování polymerního granulátu, jenž je z násypky dávkován do tavného extrudéru. Extrudér, vyhřátý nad teplotu tání daného polymeru, mění polymerní granulát na taveninu, která je šnekovou hřídelí vytlačována k zubovému čerpadlu, sloužícího k dávkování taveniny do trysek zvlákňování hubice. Průchodem zvlákňovací hubicí se vytvoří nekonečně dlouhá vlákna, která jsou průchodem vzduchovou komorou ochlazována a dlužena (ochlazování a dlužení vláken je možné provést pomocí okolního vzduchu nebo za pomoci dalších odsávacích či jiných ústrojí). Vydložená vlákna jsou ukládána na nekonečný pás, vzniká vlákenná vrstva, která je odváděna ke zpevnění, ořezu a návinu. Pro rychlost a efektivitu pojení se nejčastěji používá perforovaný kalandr či ultrazvuk [4].

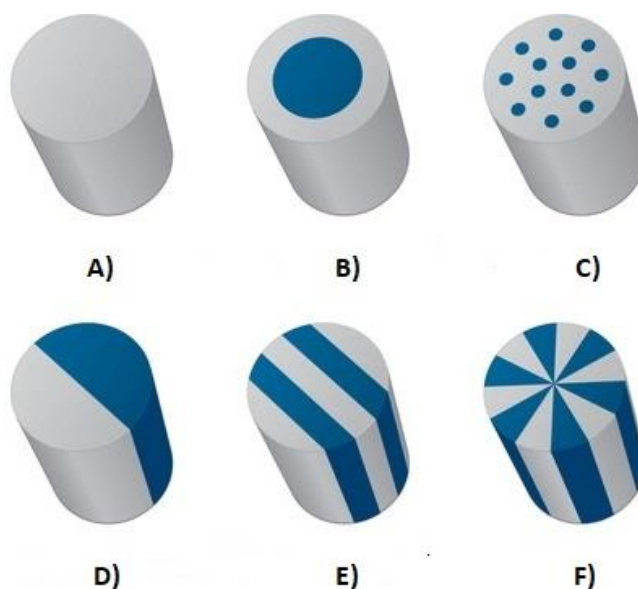
Dílčí kroky technologie určují finální vlastnosti textilie, proto mají výrobky široké použití téměř ve všech oblastech průmyslu. Hlavními výhodami jsou [5,6]:

- Rychlost výroby
- Anizotropická struktura s izotropickými mechanickými vlastnostmi
- Regulovatelná plošná hmotnost 5-800 g/m²
- Průměr vláken standardně v rozmezí 15-35 μm
- Vysoká pevnost
- Vysoká odolnost na stříh
- Vysoká pórovitost

2.1.2.1 Bikomponentní vlákna

Bikomponentní vlákna jsou definována jako umělá vlákna, vyráběná speciální zvlákňovací hubicí, do které jsou přiváděny dva či více polymerů s rozdílnými fyzikálními, chemickými a mechanickými vlastnostmi, pro získání kompozitního materiálu. Nejpoužívanějším bikomponentním vláknem je jádro/plášť, kdy filament tvoří dva druhy polymeru. Takové vlákno se nejčastěji skládá z polyethylenu (PE) a polypropylenu (PP). Polyethylen je ve formě obalu vlákna používán pro svůj jemnější a měkčí omak, kdežto polypropylen tvoří pevnější jádro vlákna. Samotná vlákna se pro snížení ekonomické náročnosti často používají jako pojivé složky vlákenné vrstvy, a proto se plášť vláken vyrábí z níže tajícího polymeru. Bikomponentní vlákna typu jádro/plášť jsou svým tvarem také ekonomicky málo náročné, neboť geometrie vlákna udává náročnost na výrobu zvlákňovací hubice a výsledné vrstvy [7,8].

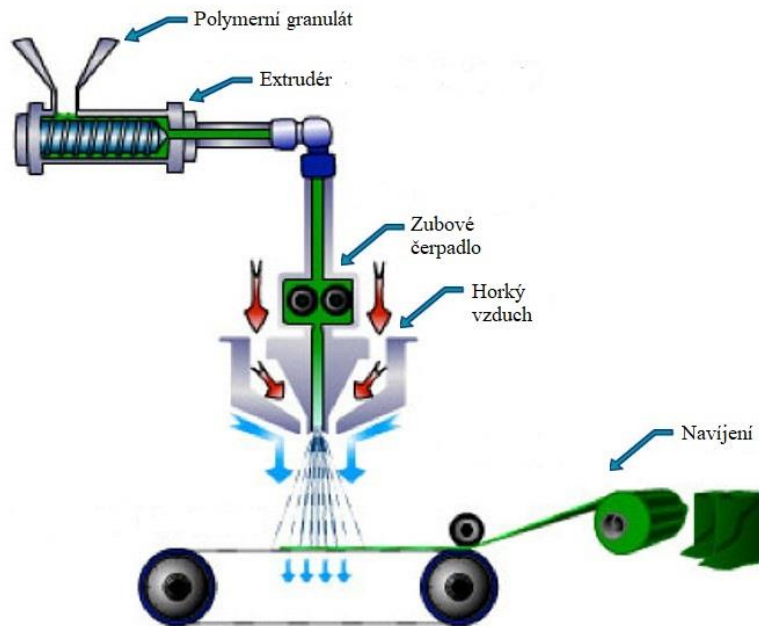
Podle průřezu vlákna lze kromě typu vlákna jádro/plášť také rozeznávat i jiné druhy bikomponentních vláken. Dalším známým druhem mohou být vlákna typu strana/strana, ostrovy v moři nebo vlákna s výsečovou strukturou. Ze základních druhů potom byly odvozeny i jejich složitější varianty, například multijádro nebo proužkovaný typ. Podoby některých z nich jsou znázorněny na obrázku 5 [9].



Obrázek 5: A) monokomponentní vlákno, B) vlákno jádro/plášť, C) vlákno ostrovy v moři, D) vlákno strana/strana, E) odvozený typ vlákna – proužkované, F) koláčový typ vlákna [9]

2.1.3 Technologie meltblown

Technologie spunbond a meltblown si jsou velice podobné. Stejně jako u technologie spunbond je název technologie meltblown odvozen z dvou hlavních procesů výroby, tedy tavení polymeru (tavit-melt) a jeho rozfoukáváním na podklad (foukat – blown).



Obrázek 6: Schématické znázornění procesu technologie meltblown [10]

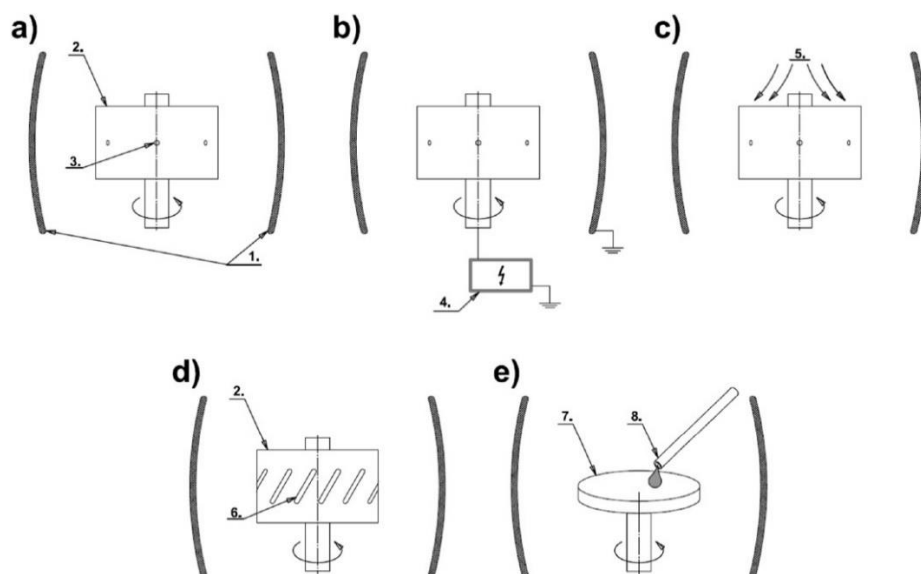
Princip technologie, znázorněno na obrázku 6, spočívá v přivádění polymerního granulátu do tavného extrudéru, který je vyhříván nad teplotu tání polymeru. Pomocí vyhřívání šnekového dopravníku v extrudéru a frikčního tření, nejen mezi granulami polymeru, ale i mezi granulami a stěnami extrudéru, se polymerní granulát mění v taveninu, která je právě šnekovým podavačem dopravována do ozubeného dávkovacího zařízení. Zubové čerpadlo má za úkol plynule dávkovat požadované množství k zvlákňovacím tryskám stroje. Zvlákňovací tryska má zpravidla zvlákňovací otvory velké pouhých několik milimetrů. Na rozdíl od průběhu výroby technologie spunbond je u meltblown procesu přímo za tryskami pod velikým tlakem přiváděn horký vzduch, který strhává taveninu polymeru a jejím unášením vytváří vlákna s konečnou délkou. Právě horký vzduch bezprostředně za tryskou definuje prodloužení, a tudíž výsledný průměr vlákna, neboť právě tam je jeho největší zrychlení a prodloužení. Vlákna se po vydloužení a částečném ochlazení ukládají na perforovaný buben nebo nekonečný dopravníkový pás, který netkanou vrstvu dopravuje ke zpevňujícím procesům, následnému řezání okrajů

a navíjení na vál. Mezi zpevňující technologické procesy se nejčastěji řadí, stejně jako u technologie spunbond, kalandrování a pojení ultrazvukem [11,12].

2.1.4 Odstředivé zvlákňování

Princip technologie odstředivého zvlákňování je založen na patentu z roku 1904, kdy byl sestrojen první stroj na výrobu cukrové vaty, a je jakýmsi alternativním přístupem k výrobě nanovláken. Oproti zvlákňování stejnosměrným proudem, které je zatím nejrozšířenější formou výroby nanovláken, je velice jednoduchou metodou jejich výroby. Zvlákňovacím elementem je zde odstředivá síla, která je dosažena za pomoci otáčivé části stroje. Polymer, ve formě polymerního roztoku či taveniny, je dopravován ke zvlákňovací jednotce (jinak také spinnereta), připojené k motoru, pomocí něhož se otáčí kolem své osy. Vlivem velké rychlosti jejího otáčení překonává odstředivá síla, působící na polymerní roztok nebo taveninu, frikční tření, unáší polymer pryč ze zvlákňovací jednotky, dochází k odpaření rozpouštědla a k rychlému zformování a vydloužení vláken. Vydloužené vlákno je potom ukládáno na kolektor, který se nachází kolem spinnerety nebo při řízeném ukládání nad ní. V závislosti na rychlosti otáčení spinnerety, jejího průměru a vzdálenosti kolektorů, je možné měnit rozměry a strukturu vzniklých vláken. Další parametry udávající výslednou podobu vláken je například okolní teplota, vlhkost vzduchu, teplota taveniny polymeru, koncentrace roztoku, typ použitého rozpouštědla a polymeru, povrch spinnerety, a podobně [13,14].

Technologie odstředivého zvlákňování nabízí rovnou několik možných variant zapojení. Jednou z variant je použití trysky (Obrázek 7 a), využívající otvory pro zvlákňování, umístěné na zvlákňovací hlavě. Odstředivé zvlákňování je také možné kombinovat s elektrostatickými silami nebo proudem vzduchu (viz. Obrázek 7 b) a c). Další možnou variantou je zařízení na výrobu cukrové vaty (Obrázek 7 d), z kterého je tato technologie odvozena. V neposlední řadě to je zvlákňování beztryskové (Obrázek 7 e), při němž je používán rotující disk.



Obrázek 7: Varianty zařízení pro odstředivé zvlákňování: a) tryskové, b) tryskové v kombinaci s elektrostatickými silami, c) tryskové v kombinaci s proudem vzduchu, d) výrobek cukrové vaty, e) beztryskové: 1 - kolektor, 2 - zvlákňovací hlava, 3 - zvlákňovací tryska, 4 - zdroj vysokého napětí, 5 – proud vzduchu, 6 - zvlákňovací štěrbin, 7 - rotující disk, 8 - dávkování polymerního roztoku či taveniny [15].

2.1.5 Výroba nanovláken za pomoci zdroje napětí

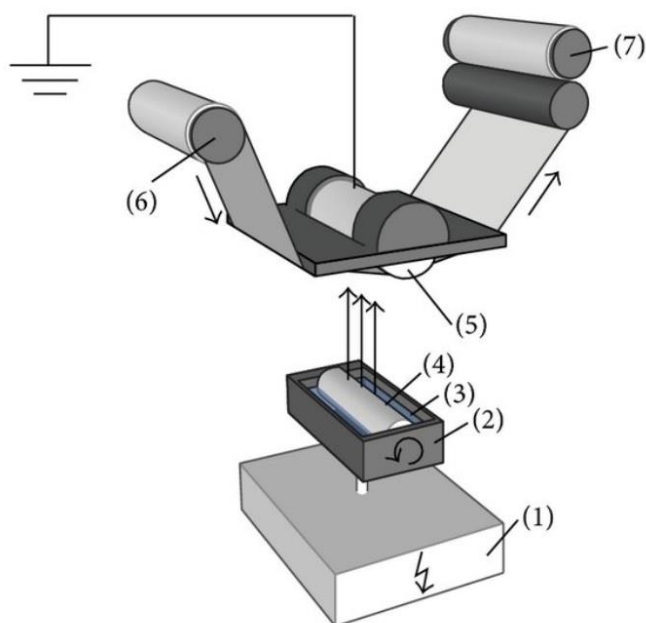
V mnoha literaturách jsou nanovlákná definována různými způsoby. V čem se literatury shodují je fakt, že nanovlákná jsou délkové útvary, charakteristické svými rozměry a vlastnostmi, jejichž délka mnohonásobně převyšuje průměr vlákna. Společnost Elmarco definuje nanovlákná jako speciálně vyráběná vlákna o průměru menším než 500 nm. Ing. Jan Hošek, PhD. označuje nanomateriály ve svých skriptech s názvem „Úvod do nanotechnologie“ jako materiály, jejichž jeden rozměr nebo vnitřní struktura je v intervalu velikosti 1-100 nm (0,001-0,1 μ m) [16]. V knize An Introduction to Electrospinning and nanofibers jsou nanovlákná považována za délkové útvary s průměrem menším než 1000nm, tedy 1 μ m. Průměr nanovláken závisí především na zvolené technologii, polymeru a konkrétně zvolených zvlákňovacích podmínkách. Typickými vlastnostmi nanovláknenných vrstev je vysoká pórovitost, prodyšnost a velký měrný povrch [17].

Výroba nanovláken se dělí na výrobu pomocí stejnosměrného (DC) a střídavého (AC) zvlákňování. V zásadě si jsou technologie velice podobny, hlavním rozdílem, jak již napovídají jednotlivé názvy, je typ přiváděného elektrického zdroje napětí ke zvlákňovací jednotce. Technologii stejnosměrného zvlákňování lze dělit na zvlákňování z polymerní taveniny nebo polymerního roztoku, zvlákňování z roztoku se dále dělí na zvlákňování jehlové a bezjehlové. Střídavým napětím lze zatím zvlákňovat jen polymerní roztoky, které se také dělí na jehlové a bezjehlové.

2.1.5.1 Stejnosměrné zvlákňování

Stejnosměrné zvlákňování, jinak také elektrostatické zvlákňování, je dosud nejznámější metodou na výrobu nanovláken, využívající stejnosměrného napětí pro přeměnu polymerního roztoku nebo polymerní taveniny ve vlákna, jejichž průměr se pohybuje v řádech nanometrů. Průměr vlákna je závislý na zvolených parametrech procesu, především na zvoleném typu polymeru, typu rozpouštědla, koncentraci polymeru, vzdálenosti kolektoru od zvlákňovací jednotky, na typu zvlákňovací jednotky a v neposlední řadě i okolních podmínkách jako je teplota vzduchu nebo vzdušná vlhkost. Technologie se dělí, jak již bylo zmíněno, na jehlové a bezjehlové zvlákňování. Při bezjehlovém zvlákňování je možné použít širokou škálu zvlákňovacích elektrod, známých také jako spinnerety. Technologie stejnosměrného zvlákňování za pomoci válečku, známá pod názvem “Nanospider“, byla vynalezena na Technické univerzitě v Liberci. Zásluha patří panu prof. RNDr. Oldřichu Jirsákovi, CSc. a jeho týmu, kteří v roce 2003 sestavili první

prototyp. Patentová práva byla následně odkoupena firmou Elmarco, sídlící ve stejném městě jako samotná univerzita, a je použita pro průmyslovou výrobu nanovláken [18].

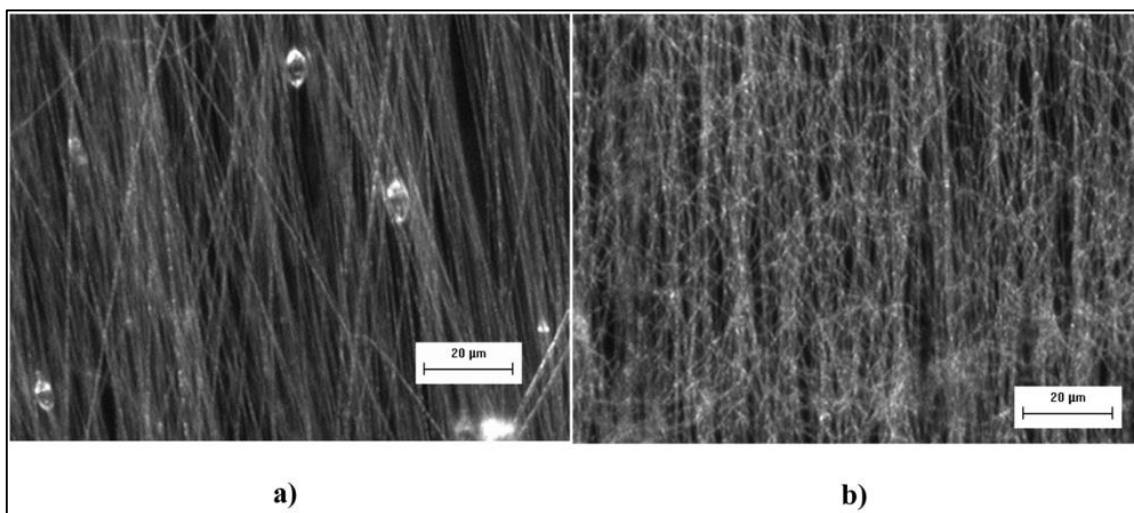


Obrázek 8: Schéma "Nanospideru": 1 - generátor stejnosměrného napětí, 2 – nádoba na polymer, 3 - roztok polymeru, 4 - rotační elektroda, 5 - uzemněná elektroda, 6 - nosný materiál (spunbond nebo meltblown), 7 – vrstva nanovláken na podkladové textílii [19].

Schematické znázornění stroje, viz. Obrázek 8. Základem zařízení pro výrobu nanovláken je zdroj vysokého napětí a dvě elektrody. Zvlákňovací elektroda, napájená stejnosměrným napětím, je v částečném kontaktu s polymerním roztokem či taveninou. Pokud na zdroji vysokého napětí přiváděného ke zvlákňovací elektrodě zvýšíme elektrické napětí, začnou se na polymerním roztoku tvořit takzvané Taylorovy kužely, které svým tvarem připomínají kosmickou loď-Ještěd. Z Taylorových kuželů se tvoří stabilní část, která při překonání kritického napětí plynule přechází v bičování. Bičováním se polymerní roztok či tavenina začíná dloužit, odpařuje se rozpouštědlo a vznikají nanovlákná, která se ukládají na většinou opačně nabitou nebo uzemněnou elektrodu, kolektor [17].

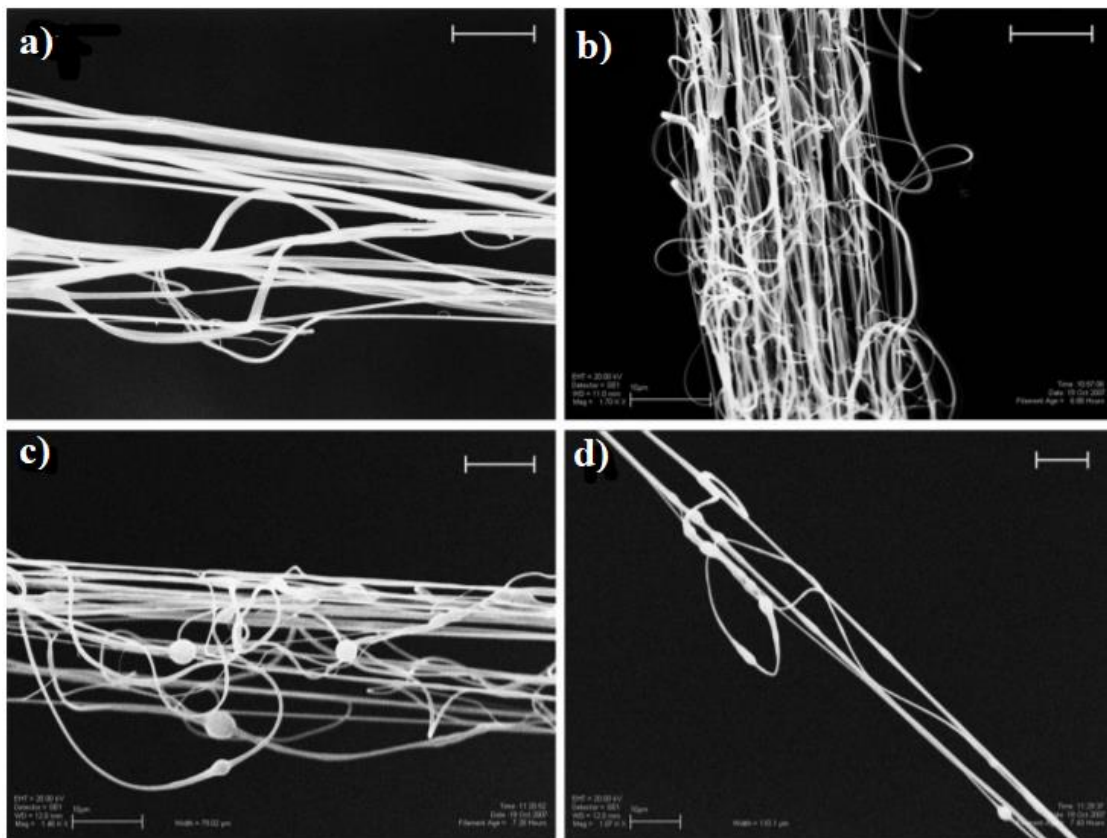
2.1.5.2 Střídavé zvlákňování

Výroba nanovláken za pomoci střídavého proudu je nejmladší z uvedených technologií na výrobu netkaných vrstev. Jedna z prvních zmínek o střídavém zvlákňování se datuje do roku 2003, kdy byl Kessickem a kolektivem vydán článek s názvem „The use of AC potentials in electrospraying and electrospinning processes“. Článek porovnává stejnosměrné (DC) a střídavé (AC) zvlákňování polyethylenoxidu. Aparát pro obě technologie byl stejný: jehla bez skleněné objímky a uzemněný otáčivý buben, umístěný 10 až 12 cm od špičky jehly. Literatura se především zamýšlí nad tvorbou samotných nanovláken. Zatímco se u DC zvlákňování standardně objevuje tvorba Taylorových kuželů a nestabilita nanovláken, u AC zvlákňování je absence nestabilní části neboli bičování, jak se tomuto jevu také jinak říká. Pro porovnání technologií se ve zmiňovaném článku také objevují snímky ze elektronového rastrovacího mikroskopu (SEM), znázorněno na Obrázek 9. Na rozdíl od DC zvlákňování (Obrázek 9 b), kde jsou vlákna orientována do všech směrů, jsou vlákna vyrobená AC zvlákňováním (Obrázek 9 a) orientována více do jednoho směru [20].



Obrázek 9: Snímky z elektronového rastrovacího mikroskopu: a) nanovlákná vyrobená střídavým (AC) zvlákňováním, b) nanovlákná vyrobená stejnosměrným (DC) zvlákňováním [20]

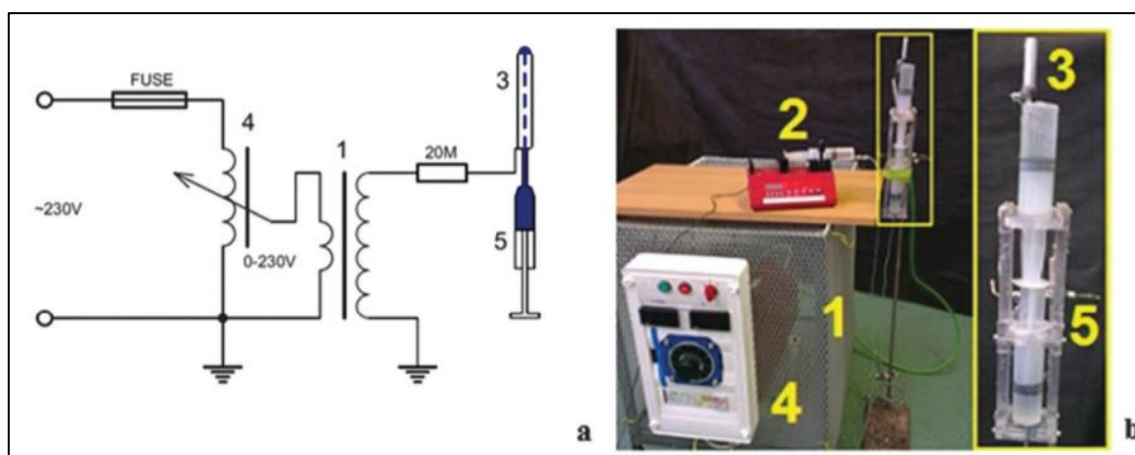
Dalším průzkumníkem v technologii střídavého zvlákňování je Siddharth Maeshwari, který se podobně jako Kessick zabýval střídavým zvlákňováním s použitím jehly a kolektoru. Za pomoci střídavého napětí se pokouší vyrobit nanovláknennou nit a popisuje průběh výroby. Na začátku článku uvádí, že vzniklá nanovláknna nevykazují přitažlivost ke kolektoru, který ani neovlivňuje tvar vzniklé pavučiny a s nanovláknny proto lze snadno, ručně nebo i proudem vzduchu, manipulovat. Technologií střídavého zvlákňování se pokouší vyrábět nit, navíjenou na flexibilní kabel. Finální nit, silná asi 1 cm, se skládá z průměrně 100 nm tlustých pramínků, které jsou vzájemně pospojovány. Významně je zde potom popsána změna morfologie příze v závislosti na frekvenci a napětí. Zatímco zvyšující napětí zvětšovalo průměr nitě, počet pramínků a tvorbu perliček, zvýšení frekvence mělo přesně opačný efekt (Obrázek 10) [21].



Obrázek 10: Morfologie vláken v závislosti na změně frekvence a napětí; měřítko 10 mm:

a) 2,23 kV, 50 Hz; b) 3,33 kV, 50 Hz; c) 3,33 kV, 100 Hz; d) 3,33 kV, 150 Hz [21]

Vědecký tým Technické univerzity v Liberci v čele s panem docentem Pokorným v září roku 2014 také uvádí článek zaměřený na střídavé zvlákňování. V úvodu článku je zmiňována jehlová varianta technologie, která je schopna produkovat pouhých pár gramů za hodinu, a proto je vhodná spíše pro testování nových roztoků, kdy není zapotřebí míchat velké množství polymerních roztoků. Pokorný s kolektivem sestavili aparát skládající se ze 100 mm dlouhé tyčky, široké v průměru 10 mm, která byla nasazena na injekční stříkačku, kterou byl za pomoci pumpy přesně dávkován polymerní roztok, viz. Obrázek 11. V počátcích experimentů je důležitý výběr nekomplikovaných a dobře známých roztoků, proto byl jejich výběrem v etanolu rozpustný polyvinylbutyral (PVB) a polyakrylonitril (PAN). Pro experiment využívali střídavého zvlákňování s frekvencí 50 Hz a výstupní napětí 30 kV, což je několikanásobně vyšší hodnota, než používali jejich předchůdci. Prvně se zde objevuje a zavádí označení “nanovláknenná vlečka“, která jednoduše a výstižně charakterizuje vzniklá vlákna. Tato vlečka se tvoří nad zvlákňovací jednotkou, a stoupá nad ní v sloupci o daném průměru jako dým. Stejně jako Maheswari se autoři zmiňují o nevyužití elektricky aktivního kolektoru, a v souvislosti s tím zavádí pojem “virtuální proti-elektroda“. Charakterem střídavého zvlákňování se virtuální proti-elektroda opakovaně tvoří v bezprostřední blízkosti zvlákňovací elektrody a skládá se z nově vytvořených opačně nabitých nanovláken. Nanovláknenná vlečka potom může být navíjena na perforovaný buben, ukládána na hladký povrch nebo navíjena jako nit [22].



Obrázek 11: a) schematické a b) reálné zapojení AC zvlákňování: Aparatura je složena z 1 – zdroj vysokého napětí – transformátor, 2 – pumpa pro dávkování polymeru, 3 – zvlákňovací elektroda, 4 – variabilní transformátor pro regulaci napětí, 5 – hydraulický systém [22]

2.2 Pojení netkaných textilií

Pojení vláknenných vrstev se provádí mechanicky, chemicky nebo termicky. Do mechanického pojení řadíme například všívání, proplétání nebo vpichování, mezi chemické pojení můžeme zařadit pojení roztoky nebo disperzemi, a nakonec do termického pojení řadíme například laminování, kalandrování nebo lisování. Termické a chemické pojení lze také rozdělit podle mikrostruktury spoje, který pojená místa vytváří. Taková místa se potom podle jejich velikosti a tvaru dělí na bodová, aglomerační a segmentová, znázorněno na obrázku 12, převzato z [12].



Obrázek 12: Mikrostruktura spoje termického a chemického pojení [23]

2.2.1 Šití

Sešívání kusů látek, kůží, kožešin apod. je asi vůbec nejstarší spojovací technikou, sahající časově až do pravěku, odhadem do dob paleolitu. V těchto starých dobách se místo kovových jehel používaly jehly kostěné a místo bavlněných či umělých nití se používaly nitě vyrobené ze zvířecích šlach, žil nebo rostlinných materiálů. Dříve jehla neměla ani podobu dnešní jehly, sloužila pouze k vytvoření vhodné velikosti otvoru pro průchod nitě. Dokonce by se s nadsázkou dalo říct, že se nejednalo o šití jako takové, ale spíš by se dalo mluvit o proplétání a svazování. Dalšímu rozvoji došlo v době bronzové asi 4000-3000 let př. n. l., která se vyznačuje i vývojem nástrojů a šperků. Jak se svět vyvíjel, vyvíjelo se i šití. Postupem času se lidé snažili o vynalezení stroje, který by jim nejen ulehčil ale hlavně zrychlil jejich práci. Největší přínos se však připisuje v dobách 18.-19. století panu Thomasu Saintovi (1790), Josefu Maderspergerovi (1814), Barthélémyovi Thimmonier (1830), Walteru Huntovi (1833) a Eliasi Howemu (1845).

Právě poslední dva zmiňovaní pánové jsou dnes označováni za vynálezce prvních funkčních šicích strojů s dvojitým stehem a člunkem, které používaly steh řetízkový. Další vývoj se zasloužil hlavně o zvýšení výkonu strojů a jejich zautomatizování se zapojením počítačů.

Vedle ručního šití, které se provádí provlékáním jehly a celé délky nitě látkou při každém stehu, je i výše zmiňované strojní šití. U ručního šití se nit provléká očkem na konci jehly. Strojové šití používá obrácené jehly, nit se provléká očkem v hrotu jehly. V dnešní době je známo mnoho druhů stehů. Nejpoužívanějším typem je takzvaný steh vázaný. Při tomto stehu se používají dvě nitě – horní a spodní. Horní nit je navlečena skrze ostrý hrot jehly, která se pohybuje nahoru a dolů. Při pohybu směrem dolů tvoří průchod a vede nit skrze látku. Zpětným pohybem směrem nahoru vytvoří očko, které je zachyceno za pomoci rotačního chapače. Jehla se vrací zpět do základní polohy a rotační chapač přehazuje vzniklou smyčku přes cívku se spodní nití. Vzniklý šev je potom ještě napínací pákou, kudy vede horní nit, utážen tak, aby křížení horní a spodní nitě bylo zhruba uprostřed tloušťky materiálu. Pro rovnoměrný pohyb materiálu je stroj opatřen podavačem, umístěným ve stehové desce. Pohybem vpřed se podavač dostává nad stehovou desku a posunuje materiál pro vytvoření dalšího švu. Pohyb podavače zpět do základní polohy je doprovázen i mírným pohybem pod stehovou desku, pro zamezení posunu materiálu zpět. Celý cyklus se opakuje a vytváří se pevný spoj. Výhodou je možnost spoj kdykoliv vypárat a případně přešít [24].

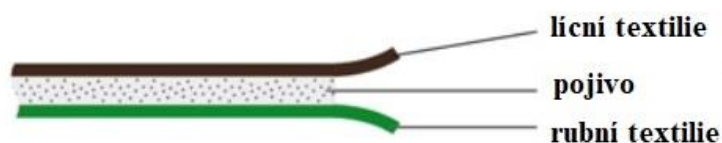
2.2.2 Lisování za tepla

Lisování se používá za účelem spojení dvou a více vrstev. Technologie se skládá ze dvou kovových desek, které jsou vyhřívány topným médiem. Vyhřívána může být jen jedna z nich nebo obě najednou, a to kapalinou nebo plynem. U lisování je možné přesně volit teplotu desek, tlak desek na materiál (je možné použít pojení i bez přítlaku), vzdálenost desek od sebe nebo čas lisování. Přítlak může být řízen hydraulicky nebo pneumaticky. Pojivými materiály při lisování mohou být samotné vrstvy polotovaru nebo je možné použít další pojivý materiál ve formě prášku, monokomponentních či bikomponentních vláken, termoplastických mřížek, past, tavenin, a podobně [24].

2.2.3 Laminace

Laminování se společně s kalandrováním a pojením pomocí ultrazvuku řadí mezi nejpoužívanější technologie pro pojení netkaných textilií. Laminování slouží především ke spojení dvou tří nebo i více vrstev. Vzniklý laminát je tvořen jednotlivými vrstvami, které celku propůjčují své základní vlastnosti, a často tvoří jednolitou plochu. Právě správnou volbou vstupních materiálů lze docílit synergického efektu a získat kompozitní materiál. „Synergický efekt nám říká, že kombinací materiálů je nutné získat nové, odlišné vlastnosti, než poskytují samotné materiály nebo lepší vlastnosti, než je jen prostý součet vlastností materiálů, z nichž se kompozitní materiál skládá. Synergický účinek je tedy objektivní charakteristika, kterou se kompozitní materiály odlišují od ostatních.“ Zjednodušeně má finální produkt lepší mechanické, chemické či fyzikální vlastnosti, než je jen pouhý součet vlastností jednotlivých vrstev, numericky se tento jev často popisuje jako $1+1=3$ [25].

Na začátku laminačního procesu je nosná vrstva, na kterou je vhodným způsobem nanášeno pojivo s jeho případným předeříváním. Aby se nejednalo o pouhé povrstvování, je na nosný materiál s pojivem přiváděna další vlákenná vrstva. Sendvičový materiál je potom dopravován do laminačního zařízení, které je vyhříváno na požadovanou teplotu a jehož přítlak je nastaven na definovanou hodnotu. Hotový laminát, znázorněn na obrázku 13, může být ještě eventuálně ochlazován a následně navíjen jako hotový výrobek. Laminace má řadu svých výhod, ale i nevýhod. Mezi pozitiva lze zařadit možnost volby pojivového materiálu a jeho nanášení. Správným výběrem pojiva lze docílit i pojení materiálů, které by jinak pojit nešly nebo by jejich pojení vyžadovalo velkou spotřebu energie. Pojivovým materiálem může být například termoplastická mřížka, hot-melt (tavenina polymeru), bikomponentní nebo monokomponentní vlákna, prášek polymeru, pasta, disperze, fólie apod. Způsoby nanášení pojiva se dělí na plošné nanášení, bodové, vzorové nebo lineární. Podle typu použitého pojiva lze laminování dělit ještě na suchou a mokrou laminaci. Negativem laminování může být nevhodný výběr pojivového materiálu nebo nevhodné nastavení přítlaku či teploty [24].



Obrázek 13: Schématické znázornění laminátu, převzato z [26].

2.2.4 Hot-melt

Technologickým postupem se řadí do termického pojení, neboť podstatou technologie je zahřívání polymerního materiálu na teplotu tání. Cílem technologie je v krátkém čase vytvořit pevný spoj, respektive nanést pojivo pro další aplikace. Hot-melt lepidla (Obrázek 14) je možné nanášet lineárně i v celé ploše, nebo jen bodovým nánosem taveniny. Aplikátory využívají topná tělesa, sloužící k roztavení lepidla a udržení jeho teploty v rozsahu teploty tání. Samotné aplikátory jsou opatřeny ventily pro rychlé otevření/zavření pro přesné dávkování polymeru. Hlavní výhodou je netoxický charakter spoje, jelikož pro změnu viskozity lepidla není zapotřebí žádného rozpouštědla. Právě absence rozpouštědel rozšiřuje možné použití pojení i do textilního, lékařského či jiného průmyslu. Další výhodou je rychlost a regulace množství nanášení taveniny [24].

Právě vlastnosti termoplastických lepidel jsou velmi důležité pro jejich aplikaci:

- Viskozita taveniny – ovlivňuje migraci pojiva a zvlhčení povrchů. Se zvyšováním teploty se snižuje viskozita.
- Index toku taveniny (MFI) – index úzce spjatý s délkou makromolekul a mechanickými vlastnostmi. Se snižující se délkou makromolekul se zvyšuje teplotnost taveniny (snižuje se viskozita) a naopak snižuje pevnost a tuhost polymeru.
- Doba zpracovatelnosti – stupeň stability v roztavené formě-informace důležitá při dlouhodobém zahřívání taveniny. Lepidlo bývá před nanášením dlouhodobě roztaveno, proto se sleduje stabilita taveniny a její tendence k rozkladu.
- Teplota vytváření vazby – minimální a maximální teplota, při níž dochází k dostatečnému smáčení materiálu a vytvoření spoje [27].

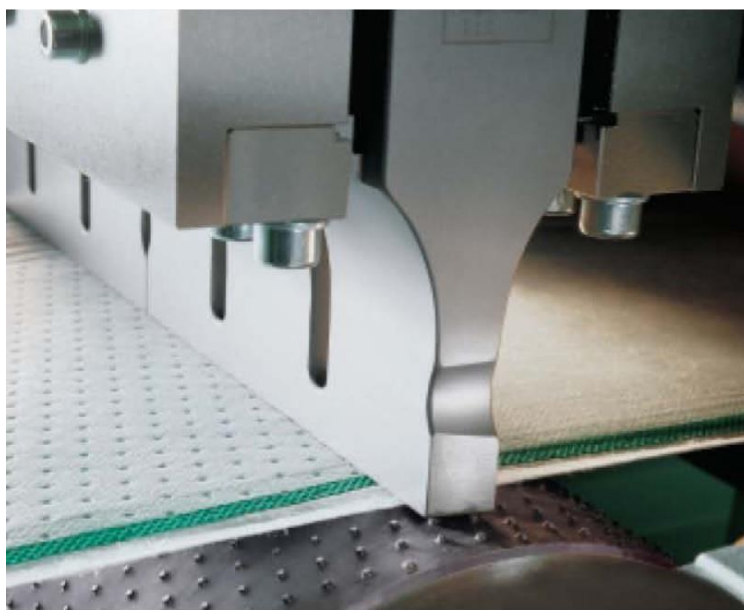


Obrázek 14: Polymerní lepidla pro technologii hot-melt [28]

2.2.5 Ultrazvuk

Původně bylo pojení pomocí ultrazvuku (Obrázek 15) vyvinuto s cílem nahradit šité spoje. Stejně jako zvuk je ultrazvuk akustické vlnění. Na rozdíl od zvuku, který člověk slyší a jeho frekvence se pohybuje v rozsahu 16 až 20 kHz, je ultrazvuk s rozmezím frekvence od 20 až 40 kHz nad hranicí slyšitelnosti. Ultrazvuk vzniká periodickým nabíjením, přiváděním elektrické energie, do vhodného materiálu. Takovým materiálem je například titan, titanové slitiny, slitiny některých z ocelí, olověné slitiny, slitiny křemene nebo superdural. Nastává piezoelektrický jev, který má v jednoduchosti schopnost se deformovat, ve smyslu se smršťovat a rozpínat působením elektrického napětí, tím vzniká mechanické vlnění. Ultrazvukové pojení je tedy technologie, která mění elektrickou energii ve vysokofrekvenční mechanický pohyb-vibrace. Mechanická energie je při kontaktu s materiálem pomocí povrchového a mezimolekulárního tření převedena na tepelnou energii, ta svým působením zapříčiňuje měknutí nebo tavení materiálu a vytváří se tak nerozebíratelný spoj.

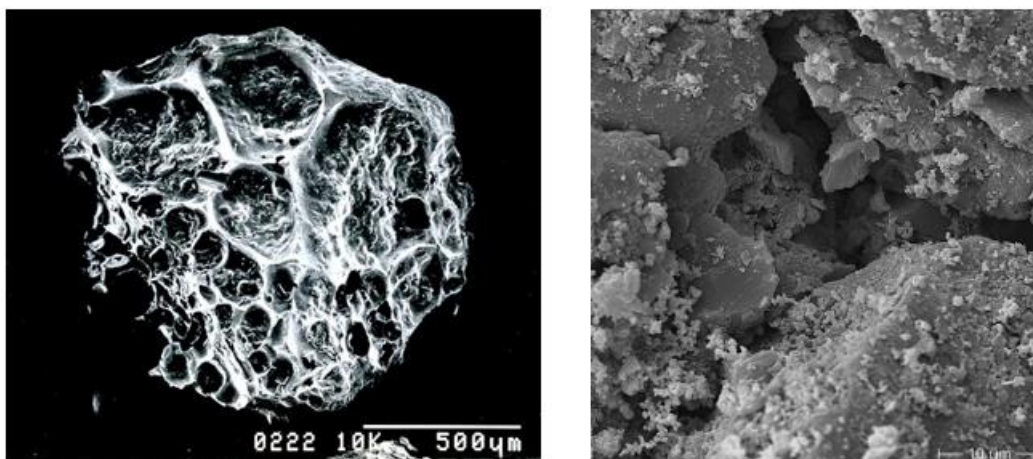
Hlavními výhodami technologie je krátký čas potřebný pro vytvoření spoje - typicky kratší než 1 vteřina, rychlost výroby (100-150 m/min), čistota technologie, netoxičita spoje – absence rozpouštědel, jednoduchost technologie, a podobně. Mezi nevýhody se řadí občasné vytvořené záblesky s možným vzplanutím materiálu, generované vibrace, které mohou ovlivnit citlivější materiály, nebo omezení použití maximální možné tloušťky materiálu [4,24].



Obrázek 15: Bodové pojení ultrazvukem, převzato z [29].

2.3 Aktivní uhlí (AU)

Aktivní uhlí (Obrázek 16) je jedním z nejvýznamnějších adsorbentů. Význam slova adsorpce je zjednodušeně vykládán jako schopnost látky vázat atomy či molekuly plynu, kapaliny nebo pevné látky na svůj povrch účinkem mezipovrchových přitažlivých sil. Jeho schopnosti jsou dány mikroporézní strukturou, která disponuje velkým měrným povrchem a vysoký stupněm povrchové reaktivity. Povrch aktivního uhlí je zastoupen především mikropóry s poloměrem do 2 nm, které tvoří asi 95 % povrchu. Zbytek povrchu tvoří takzvané transportní póry, mezopóry s poloměrem 2-50 nm a makropóry s poloměrem větším než 50 nm. Některé literatury uvádí tak vysokou porozitu, že gram aktivního uhlí dosahuje plochy 300-4000 m². Velikost, četnost a typ pórů se odvíjí od použité suroviny při výrobě aktivního uhlí. U aktivního uhlí vyráběného ze dřeva převládají makropóry, z kokosových skořápek zase mikropóry a výrobou z černého uhlí lze získat AU s rovnoměrným zastoupením transportních pórů i mikropórů [30,31].

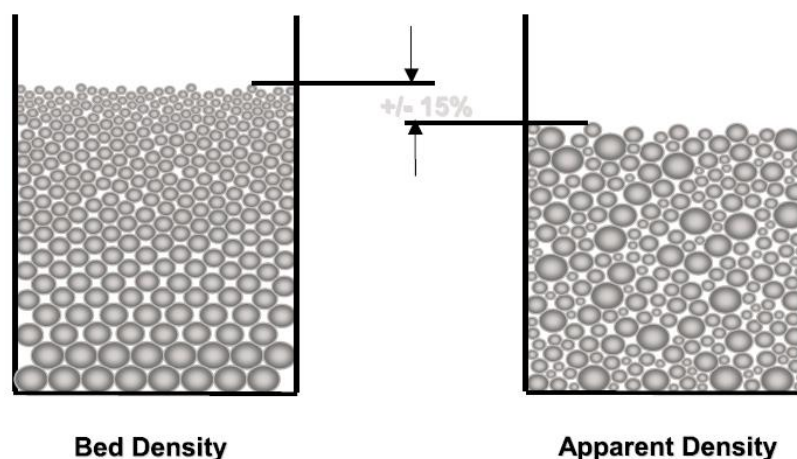


Obrázek 16: Snímky aktivního uhlí z elektronového mikroskopu

U aktivního uhlí sledujeme především tyto parametry:

- **velikost částic** – se udává v jednotkách mesh, což je údaj hustoty síta, kterým propadnou částice o odpovídající velikosti. Čím vyšší hodnota mesh, tím menší částice propadají (viz. Tabulka 1)
- **koeficient stejnoměrnosti** – je indikátorem distribuce velikosti částic aktivního uhlí. Čím je hodnota menší, tím je rozdíl velikosti největších a nejmenších částic menší.
- **Hustota** – lze měřit sypanou hustotu (apparent density) - maximální hustota po vibračním setřesení, "bed density" (v případě pitné vody se nazývá "backwashed &

drained density"), která se používá pro přepočítání objemu a hmotnosti aktivního uhlí a další jako jsou "bulk density", "real density", atd. Rozdíl mezi "apparent density" a "bed density" je asi 15 % pro aktivní uhlí vyrobené z černého uhlí, viz. Obrázek 17.



Obrázek 17: Rozdíl mezi "apparent density" a "bed density" [32].

- **celkový povrch** – udáván v m^2/g . Větší část celkového povrchu se nachází v mikropórech, které jsou odpovědné za adsorpci.
- **jódové číslo** – základní parametr, charakterizující účinnost aktivního uhlí. Udává se v miligramech jódu, absorbovaného 1 gramem aktivního uhlí. Jeho rozsah bývá 500–1200 mg/g a je mírou mikroporozity.
- **dechlorační půlhodnota** – vyjadřuje účinnost a životnost aktivního uhlí při odstraňování silných oxidačních látek jako je ozón, chlórdioxid nebo chlór. Princip odstraňování oxidačních látek (kombinace katalýzy rozkladu oxidačního činidla a reakce na povrchu aktivního uhlí) je odlišný od odstraňování (adsorpce) organických polutantů (např. snižování CHSK). Čím nižší je dechlorační půlhodnota, tím je aktivní uhlí účinnější a má delší životnost pro odstraňování oxidačních látek. Dechlorační půlhodnota je výška sloupce aktivního uhlí v cm, na kterém se snížila koncentrace chlórů ve vodě na 50 % [31].

2.4 Testování netkaných textilií

Testování fyzikálních vlastností netkaných textilií je nezbytné pro jejich charakteristiku. Existuje řada zkušebních metod, používaných pro stanovení vlastností netkaných textilií; tato kapitola se zabývá měřeními vlastnostmi netkaných textilií a zkušebními metodami, které se používají při jejich stanovení.

2.4.1 Prodyšnost

Prodyšnost je vlastnost materiálu, která určuje průchod vzduchu skrze póry materiálu. Je nesmírně důležitá, neboť přímo ovlivňuje tepelné vlastnosti a do určité míry ovlivňuje komfort textilie.

Dle normy ČSN EN ISO 9237 je prodyšnost definována jako rychlost proudu vzduchu procházejícího kolmo vzorkem textilie při definovaném rozdílu tlaků na protějších stranách textilie, době a zkušební ploše. Podstata měření spočívá ve vytvoření tlakového rozdílu protějších stran textilie. Důsledkem vzniklého rozdílu tlaku je snaha tento rozdíl snížit, a tak dochází k průchodu vzduchu přes póry textilie [32,33]

$$R = \frac{Q_v}{A} * k \quad (1)$$

Prodyšnost R [mm/s], při konkrétním tlakovém rozdílu, je dána vztahem (1) kde:

R prodyšnost [mm/s],

Q_v objemové množství protečené tekutiny [m³/s],

A plocha vzorku, kterou prochází vzduch [m²],

k koeficient převodu jednotek [-]. [32]

Propustnost vzduchu je jednou z důležitých vlastností při výrobě netkaných textilií jako jsou filtry, prodyšné vložky, ochranné oděvy a další aplikace, například hygienické oděvy. Bylo zjištěno, že existuje mnoho faktorů, které mohou ovlivnit prodyšnost. Některé z faktorů, ovlivňujících propustnost vzduchu: počet, hloubka a velikost pórů; tloušťka materiálu – prodyšnost se snižuje se zvyšující se tloušťkou materiálu; zákrut příze; profil vlákna (charakter jeho průřezu); konstrukce vrstvy (pletené textilie mají vyšší propustnost než tkané látky v důsledku roztažnosti pleteniny) [34].

2.4.2 Permetest

Přístroj Permetest, takzvaný Skin model, je přístroj na měření paropropustnosti textilie. Při testování měří relativní propustnost zkoušeného vzorku pro vodní páry p [%]. Tento parametr je nenormalizovaný, avšak velice užitečný, neboť 100 % propustnost simuluje tepelný tok q_o , vyvozen odparem z volné hladiny o stejném průměru jako má měřený vzorek. Zakrytím takové vodní hladiny měřeným vzorkem se pak tepelný tok sníží o hodnotu q_v . Potom platí vztah (2):

$$p = 100(q_v/q_o) [\%] \quad (2)$$

Přístroj simuluje suchou a mokrou pokožku člověka z hlediska tepelného pocitu a slouží k určení množství par a výparného odporu. Aby byly zachovány izotermické podmínky při měření, je měřicí hlavice pomocí elektrické topné spirály udržována na teplotě okolního vzduchu (obvykle 20-23 °C), který je do přístroje nasáván. Vnější strana je pro simulaci proudícího vzduchu ofukována proudem vzduchu o rychlosti 1 m/s. Při měření je měřicí hlava přikryta semipermeabilní membránou, aby nedošlo ke smočení měřeného vzorku a k ovlivnění výsledků. Při měření se v porézní vrstvě mění voda v páru, která přes semipermeabilní fólii prochází vzorkem. Výparný tok je potom měřen čidlem a jeho hodnota je přímo úměrná paropropustnosti a nepřímo úměrná výparnému odporu. Samotné měření se řídí podle normy ISO 11092. Pro stanovení výparného odporu platí rovnice (3).

$$Ret = (P_m - P_a) \cdot (q_v - q_o) [\text{Pa} \cdot \text{m}^2/\text{W}] \quad (3)$$

Hodnoty P_m a P_a představují parciální tlak nasycené vodní páry v Pascalech platný pro okolní teplotu a skutečný parciální tlak vodních par v laboratoři [35].

2.4.3 Jodotest

Metodika jodotest je určena k hodnocení rezistence materiálu, používané k výrobě ochranných prostředků a jejich součástí, vůči pronikání jódu v plynné formě. Jodotest poskytuje informace o rezistenci materiálu i vůči jiným chemickým bojovým látkám (CWA – z anglického chemical warfare agents), protože pokud je při jodotestu naměřena rezistenční doba (RD), je to nejnižší doba, po kterou je vzorek rezistentní proti těmto bojovým látkám.

Pomůcky: Samotná zkušební sestava se skládá ze dvou skleněných nádobek, dvou silikonových mezikruží o vnějším průměru 50 mm a vnitřním průměru 20 mm a distančního kroužku. Pro testování je také potřebný škrob a destilovaná voda.

Příprava zkoušky: Nejprve je nutné vyrobit indikační roztok, který se vyrábí z destilované vody a škrobu. 1 g škrobu se rozpustí v 50 ml studené destilované vody. Připravený roztok se potom pomalu ještě vlévá do 500 ml vroucí destilované vody. Z testovaného materiálu se vysekne vzorek o průměru 50 mm.

Složení aparátu a průběh zkoušky: Složený aparát je znázorněn na obrázku 43. Do spodní nádoby odměříme 3 ml škrobového mazu. Vyseknutý materiál, vložený mezi silikonové mezikruží, položíme na spodní nádobku. Na vrchní silikonové mezikruží položíme distanční kroužek s jodovou tabletou, přikryjeme skleněnou nádobkou a případně aparát ještě upevníme svorkami. Od tohoto okamžiku, při požadované teplotě a pravidelných intervalech (minimálně 10 minut), sledujeme barevné změny na indikačním roztoku - škrobovém mazu. Při zjištění modrých pramínků, které indikují procházející jód, zaznamenáme čas. Doba od začátku expozice do tohoto okamžiku se označuje jako rezistenční doba [36].

2.4.4 Test odolnosti materiálu vůči kapkám Somanu

Metodika pro stanovení rezistenční doby proti pronikání somanu je určena k hodnocení rezistence materiálu, používaného k výrobě ochranných prostředků a jejich součástí, vůči pronikání somanu v plynné i kapalně formě. Stejně jako u Jodotestu se měří doba, která uplyne od počátku zkoušky až do objevení se změny ve zbarvení indikačního roztoku.

Pomůcky: Samotná zkušební sestava se skládá ze dvou skleněných nádobek, dvou silikonových mezikruží o vnějším průměru 50 mm a vnitřním průměru 20 mm a silikonové membrány a parafínová páska na utěsnění. Pro výrobu indikačního roztoku je zapotřebí benzidinu hydrochlorid, perboritan sodný, citran sodný, destilovaný ethylalkohol, redestilovaná voda a dvojchroman draselný. Samozřejmě je také důležitý samotný testovaný roztok somanu o obsahu minimálně 92 % pinakolylmethylfluorfosfonátu.

Příprava zkoušky: Nejprve je nutné si připravit indikační roztok, který musí být každý den vždy čerstvý. Roztok A: 0,2 g benzidinu hydrochloridu se rozpustí ve 40 ml redestilované vody a doplní se na 100 ml destilovaným ethylalkoholem. Roztok B: 0,25 g perboritanu sodného se rozpustí ve 100 ml redestilované vody. Roztok C: 10 g citranu sodného se rozpustí ve 100 ml redestilované vody. Smísením roztoků A, B, C v poměru 1:2:2 se připraví indikační roztok v požadovaném množství. Také se připraví 0,004 % roztok dvojchromanu draselného ve vodě.

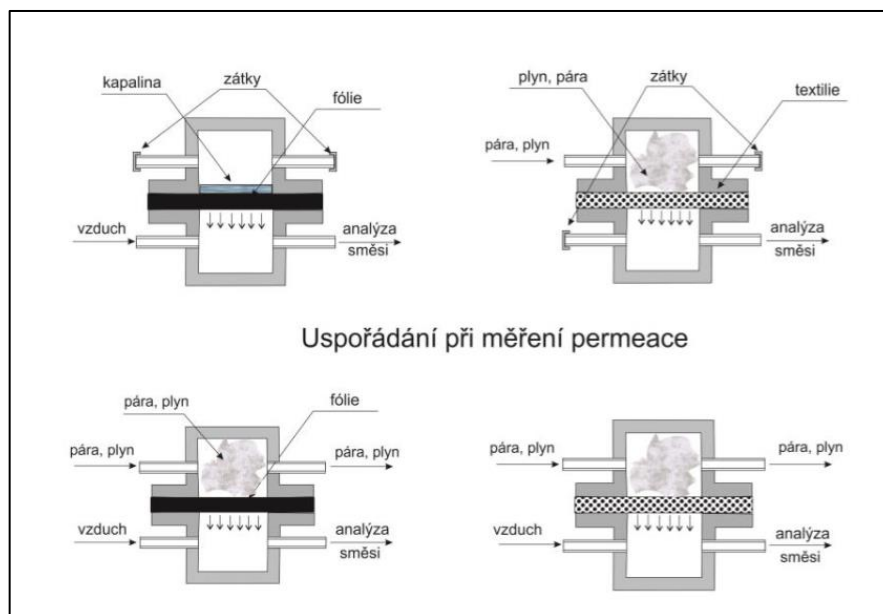
Složení aparátu a průběh zkoušky: V případě použití kapalného somanu se do skleněné nádoby odměří 2,5 ml indikačního roztoku. Na nádobku se položí zkoušený vzorek o průměru 50 mm a vložený mezi dva těsnící mezikruží. Poté se na zkoušený vzorek položí dnem vzhůru druhá nádobka. Obě nádoby se sepnou svorkami, utěsní parafínovou páskou po obvodu nádobek a celá sestava se vloží na 10 minut do termostatu, kde se aparát zahřívá na požadovanou teplotu. Při přípravě je třeba počítat s tím, že jedna sestava nádobek bez testovací kapaliny, pouze se 2,5 ml srovnávacího roztoku dvojchromanu draselného slouží jako srovnávací. Vloží se současně se vzorky do termostatu. Zkušební kapalinu (soman) je nutné rovněž temperovat na teplotu, při které se bude měřit vzorek. Po vyhřátí na danou teplotu se sundá horní skleněná nádobka a na zkoušený vzorek se nanese 5x0,5μl somanu. Sestava se sepne svorkami a od této chvíle se měří čas expozice. V průběhu testování je nutné udržovat konstantní teplotu testovacího aparátu, proto se po celý čas uchovává v termostatu a v pravidelných intervalech se zamořené vzorky vyjímají

z termostatu a porovnávají se se slepým vzorkem a standardním roztokem se pozoruje intenzita vzniku žlutého zabarvení. Okamžik dosažení intenzity zabarvení shodného se standardem se pokládá za průnik somanu nebo též rezistenční dobu (RDS₀) [37].

2.4.5 Metodika Carousel

„Princip metodiky je založen na omývání povrchů vzorků proudícím plynem (zpravidla čistým vzduchem) nebo prosávání par jejich porézní strukturou a následnou analýzou pomocí plynového chromatografu s více detektory. Měření je automatizováno pro sledování na osmi měřicích místech (permeačních nádobkách) a umožňuje současnou aplikaci různých vzorků ochranných materiálů a chemických látek. Omývání lze realizovat periodickým odběrem nebo kontinuálně různou rychlostí proudění vzduchu. Měřena je časová závislost změny výstupní koncentrace chemické látky, z níž jsou odvozovány další veličiny.“ [38]

Příprava vzorků: Z testovaného vzorku se vyseknou vzorky o průměru minimálně 58 mm. Počet připravených vzorků může být 1-8, všechna permeační hnízda nemusí být obsazena. Vzorky se vloží mezi dvě části permeační nádoby a sevrou třmeny po obou stranách. To platí i při testování vícevrstvého systému nebo kompozitu. Vrchní stranou je pak ta část, která přichází s přímým kontaktem s testovací látkou. Připravené vzorky se našroubují do jednotlivých permeačních hnízd kolem deseticestného elektromagnetického ventilu. Jednotlivá hnízda se potom propojí tak, aby došlo k proměření všech vzorků, viz. Obrázek 18 [38].



Obrázek 18: Možné uspořádání permeačních nádob při měření průniku [38]

3 Praktická část

Praktická část diplomové práce se zaměřuje na návrh a výrobu nosných vlákných vrstev pro sorbenty, jejich testování na prodyšnost, paropropustnost, úbytek částic aktivního uhlí a průnik chemických bojových látek, které byly testovány ve Státním ústavu jaderné a chemické obrany v Brně. Zaměřuje se také na vnášení částic aktivního uhlí do nosného materiálu a zvýšení jeho homogenity v ploše.

3.1 Odstředivé zvlákňování

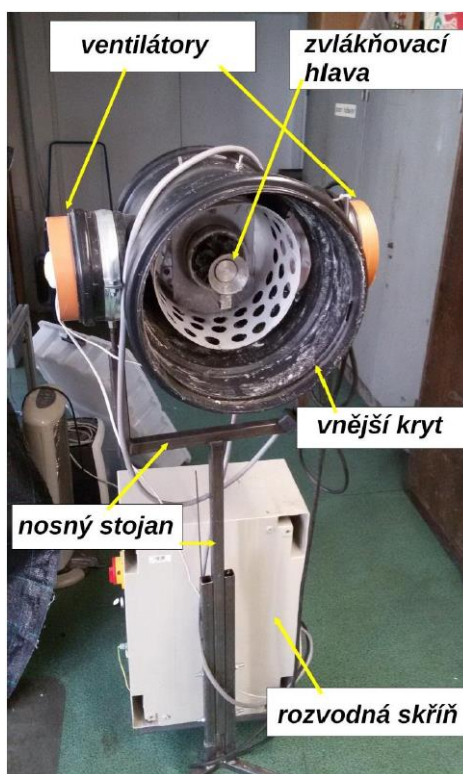
Prvním krokem v technologii odstředivého zvlákňování byl výběr a příprava polymerů v různých koncentracích. Vybraným polymerem byl polyamid 6 (PA6), polystyren (PS), polycaprolacton (PCL) a polyvinylidenfluorid (PVDF). V Tabulka 1 jsou potom uvedeny polymery s použitými rozpouštědly a jejich koncentrace.

Tabulka 1: Použité polymery pro odstředivé zvlákňování

Polymer	Rozpouštědlo	Koncentrace (%)
PA6	kyselina octová/kyselina mravenčí – 1:1	12
PS	tetrahydrofuran	12
PCL	chloroform/etanol – 9:1	12
PCL	kyselina octová/kyselina mravenčí – 1:1	12
PVDF	DMAC/Aceton – 8:2	12

Namíchané polymery byly nejdříve zkoušeny na malém odstředivém rotujícím disku, znázorněný na obrázku 7 e), kde bylo zkoumáno, zda se polymery s danou koncentrací zvlákňují za pomoci odstředivého zvlákňování. Na otáčivý element bylo kapáním (z výšky asi 5 cm) z lahvičky dávkován polymerní roztok a pozorováno, zda se v prostředí kolem rotujícího disku tvoří vlákna. Poznatky z malé stolní technologie byly potom přeneseny na sofistikovanější technologii odstředivého zvlákňování v kombinaci proudu vzduchu (Obrázek 19). Odstředivé zvlákňování v kombinaci s proudem vzduchu je ve své podstatě složeno z jednoduchých technologií – odstředivé síly a proudu vzduchu. Při této technologii je možné kontrolovat rychlost otáčení zvlákňovací jednotky. Rychlost otáčení je úzce spjata s odstředivou silou, tedy pokud budou otáčky příliš nízké, roztok bude jen stěží překonávat povrchové napětí a bude zůstat na spinneretě. Dávkování polymeru bylo prováděno pomocí injekční stříkačky, kterou bylo možné kontrolovat dávkování polymerního roztoku. Jak bylo zjištěno, technologie ve své podobě není tak

jednoduchá, jak by se na první pohled mohlo zdát. Proud vzduchu vytvářel turbulence a na povrchu spinnerety se rychle vytvořil film, který znevýhodňoval další tvoření vláken. Dokonce se nepodařilo zvláknit polymery, které bylo možné zvláknit na rotujícím disku, znázorněno v Tabulka 2. Při zvláknování roztoků docházelo k tvorbě krátkých mokrých vláken, někdy až žmolků, které byly ukládány na podkladový materiál. Jak bylo později zjištěno, problematikou zvláknování se zabývala i práce s názvem “Řešení odvodu vláknitého materiálu při odstředivém zvláknování“. Nejen pro velkou spotřebu roztoku a nízkou výtěžnost vláknitého materiálu jsme se rozhodli od technologie odstoupit.



Obrázek 19: Zařízení pro odstředivé zvláknování v kombinaci s proudem vzduchu [39]

Tabulka 2: Záznam při odstředivém zvlákňování

Polymer	Odstředivé zvlákňování: Rotující disk	Odstředivé zvlákňování v kombi- naci s proudem vzduchu
PA6	zvlákňuje	hůře zvlákňuje
PS	zvlákňuje	hůře zvlákňuje
PCL – chloroform a etanol	zvlákňuje	hůře zvlákňuje
PCL – kyselina mrav. a octová.	zvlákňuje	hůře zvlákňuje
PVDF	nezvlákňuje	nezvlákňuje

3.2 Kombinace technologií meltblownu a AC zvlákňování

Inspirace kontinuální výrobou již skoro hotových vrstev přišla z diplomové práce s názvem “Kombinace výroby vláknenných vrstev technologií meltblown a střídavého elektrostatického zvlákňování“. Bc. Jan Kovačičin se zde zabývá návrhem vhodného uspořádání technologií meltblown a AC zvlákňování pro kontinuální výrobu vláknenné vrstvy. Popisuje zde parazitní vzdušné proudy, které měly za následek obtékání kolektoru nanovláknennou vlečkou a jejím špatným zachytáváním se na něj, a proto zde navrhuje několik možných řešení jako je ochranný kryt, zástěna apod. [40].

Prvním krokem bylo zjistit, který polymer použijeme pro AC zvlákňování. Rozhodli jsme se vyzkoušet polymery, které byly použity při odstředivém zvlákňování, ale s použitím různých koncentrací, viz. Tabulka 3. Pro testování roztoků se používá zvlákňování z tyčky, při kterém není zapotřebí míchat velké množství roztoku. Na kovovou tyčku jsme nanесли polymer, nad ni jsme umístili kolektor v podobě černého papíru, zapnuli zdroj vysokého napětí a čekali, zda se bude tvořit nanovláknenná vlečka. Nanovláknenná vlečka, jak popisuje Tabulka 3, se tvořila v případě polyamidu 6 a polycaprolactonu. S ohledem na cenu suroviny a zkušenosti při zvlákňování polymeru střídavým napětím byl vybrán polyamid 6.

Tabulka 3: Polymery pro střídavé zvlákňování

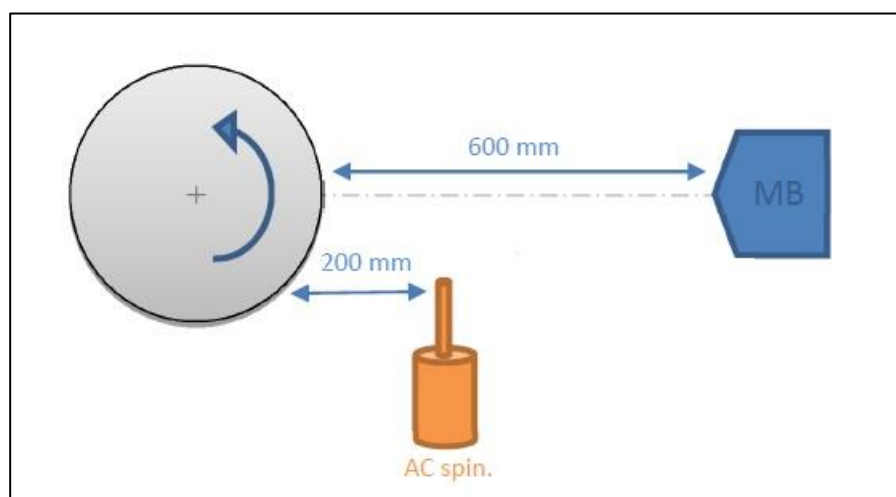
Polymer/rozpouštědlo	Koncentrace (%)	Zvlákňuje
PA6 Kyselina mravenčí a kyselina octová - 1:1	12	Ano
	16	Ano
	20	Ano
PS tetrahydrofuran	12	Ne
	15	Ne
	18	Ne
PCL Kyselina mravenčí a kyselina octová - 1:1	12	Ano
	14	Ano
	16	Ano
PCL Chloroform a etanol – 9:1	12	Ne
	14	Ne
	16	Ne
PVDF DMAC/Aceton – 8:2	14	Ne
	18	Ne
	22	Ne

Pro pochopení textu byly technologie a vstupní parametry (Tabulka 4) nastaveny podle předlohy, jak Kovačičin uvádí ve své práci. Pro testování byla použita pouze jedna zvlákňovací tryska, umístěna na podstavec pod osu trysky stroje meltblown, znázorněno na obrázku 20, a ne dvě trysky, jak popisuje v kapitole 4.8 Metoda 3 – melt blown s elektrostatickým zařízením varianta A a B pod osou. Na kolektor byla připevněna podkladová textilie spunbond z bikomponentních vláken polypropylen/polyethylen (typ jádro/plášť – 80/20) a na ni nanovlákněná vrstva z polyamidu, vyrobená střídavým zvlákňováním. Na nosné vrstvy byl potom zvlákňován kompozitní materiál složený ze střídavého zvlákňování a technologie meltblown. Nosné spunbond vrstvy slouží jako krycí materiál, zamezující poškození nanovláken a kompozitní vrstvy. Nanovlákněná mají za úkol zamezit pohybu částic aktivního uhlí mimo textili. Spuštěním technologií při tomto uspořádání jsme se opravdu setkali s parazitními vzdušnými proudy, které strhávaly nanovlákněnou vlečku pod kolektor. Nanovlákněná kolektor po obvodu obepisovala a bylo nutné jim k zachycení na podkladovou vrstvu pomoci. Po jejich přichycení k podkladové textilii byla nanovlákněná vlečka schopna se sama navíjet, avšak docházelo

k unášení části vlečky, která se proudem vzduchu kroutila, nekontrolovaně se ukládala na kolektor a docházelo k nestejnomyrnému ukládání. I přes veškeré potíže jsme nechali proces běžet a pokusili se vyrobit slepý vzorek. Výroba slepého vzorku posloužila především k seznámení s procesem.

Tabulka 4: Vstupní parametry [40]

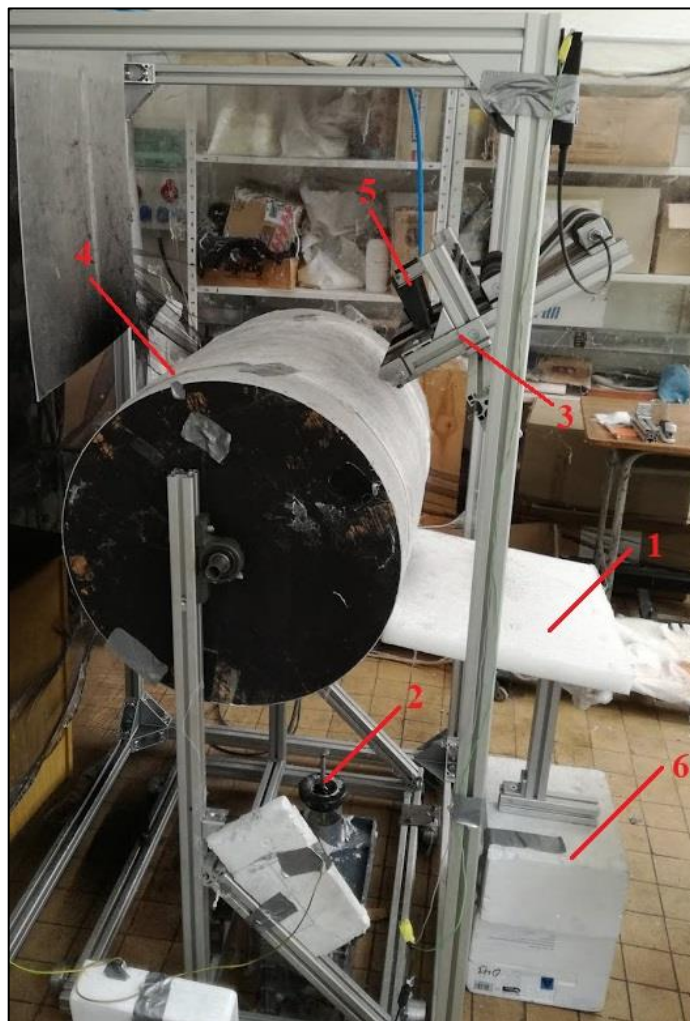
Tlak vzduchu meltblown trysky (kPa)	Rychlost extrudéru (otáček/min)	Rychlost kolektoru (otáček/min)	Vzdálenost kolektoru od trysky meltblownu (mm)
150	100	5,75	600



Obrázek 20: Sestavení technologie AC zvlákňování a meltblown [40]

Při druhém pokusu o výrobu vzorků (Obrázek 21) jsme se rozhodli k přemístění zvlákňovací elektrody pod kolektor. Na rám kolektoru bylo také připevněno naprašovací zařízení pro dávkování aktivního uhlí, které bylo ve vzdálenosti asi 20 cm od kolektoru a do jehož zásobníku bylo nasypáno 10 g aktivního uhlí. Po spuštění procesu byla nanovlákná vlečka, i přes veškerou snahu, unášena slabým parazitním proudem vzduchu. Pro ještě větší snížení účinků parazitních proudů větru byla pod osu trysky meltblownu uložena polystyrenová deska. Ta byla položena těsně ke kolektoru tak, aby nezasahovala do vyrobené vrstvy, ale nesměla být moc daleko, aby byla účinná proti proudům větru. Před spuštěním celého procesu společně s naprašováním bylo nutné nejprve povláknit nosný materiál, kterým byla opět spunbond textilie s vrstvou stejnosměrně zvlákněných nanovláken. Povlákněním nosného materiálu byla vyrobena záchytná vrstva pro aktivní uhlí a mohlo dojít ke spuštění naprašovacího zařízení, avšak už při jeho zapnutí bylo jasné, že se aktivní uhlí, nejen vzdušnými proudy od meltblownu, rozprašuje do celého

laboratorního prostoru a není možné kontrolovat množství aktivního uhlí, které se dostane do vytvářené vrstvy. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto pro snížení vzdálenosti naprašovacího zařízení od kolektoru asi na 7 cm. Bohužel ani zmenšení vzdálenosti nepomohlo ke snížení prášení do okolí laboratoře. Vyrobený kompozitní materiál byl následně laminován při 132 °C při rychlosti dopravníku 2,3 m/min. Během laminování bylo manipulováno i s přítlakem, který byl postupně nastavován na 10 N, 5 N, 0,5 N a 0 N. Laminované vrstvy se však nejevily jako vhodné pro použití, neboť byly dost tvrdé a neforemné. Zejména kvůli nepřesnému naprašování, rozptýlení částic do okolí a pro nízkou objemnost vzorku jsme se rozhodli od technologie odejít.



Obrázek 21: Sestavení technologií AC zvlákňování a meltblownu: 1 – polystyrenová deska proti parazitnímu proudu vzduchu, 2 – zvlákňovací tryska umístěná pod kolektorem, 3 – naprašovací zařízení, 4 – kolektor s podkladovou textilií, 5 – násypka s částicemi aktivního uhlí

3.2.1 Morfologie kompozitní vrstvy z AC zvlákňování a meltblownu

Morfologie vlákenného kompozitu byla prováděna ze snímků pořízených na SEM a jsou uvedeny níže v kapitole. Vyhodnocení se provádělo pomocí softwaru ImageJ – podrobný postup zpracování snímků a jejich vyhodnocení jsou uvedeny v textu práce.

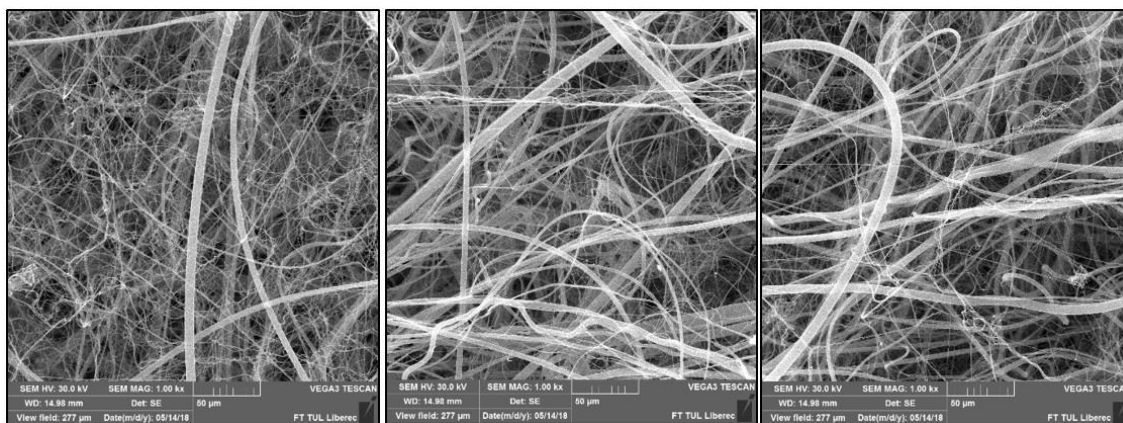
1. Měření průměrů vláken

Na Obrázek 22 jsou zobrazeny snímky kompozitní vrstvy slepého vzorku, bez částic aktivního uhlí. Oproti tomu lze na Obrázek 23 vidět vlákennou vrstvu s inkorporovaným aktivním uhlím. Struktura vlákenných vrstev je členitá, složena z náhodně orientovaných vláken, která se různě prolétají mezi sebou. Defekty se objevují jen ojedinelé, a to spíše u nanovlákných útvarů, což mohlo být způsobeno přidáním kyseliny sírové pro zvýšení efektivity zvlákňování. Rozložení i velikost částic aktivního uhlí je spíše nahodilé. Porovnáním obrázků lze rovněž vidět četnost výskytu nanovláken. Zatímco u slepého vzorku lze pozorovat vysoký výskyt nanovláken, u vzorků s aktivním uhlím četnost prudce klesla. Úbytek nanovláken si lze vysvětlit možným strháváním nanovlákné vlečky proudem vzduchu a jejich nestejným ukládáním.

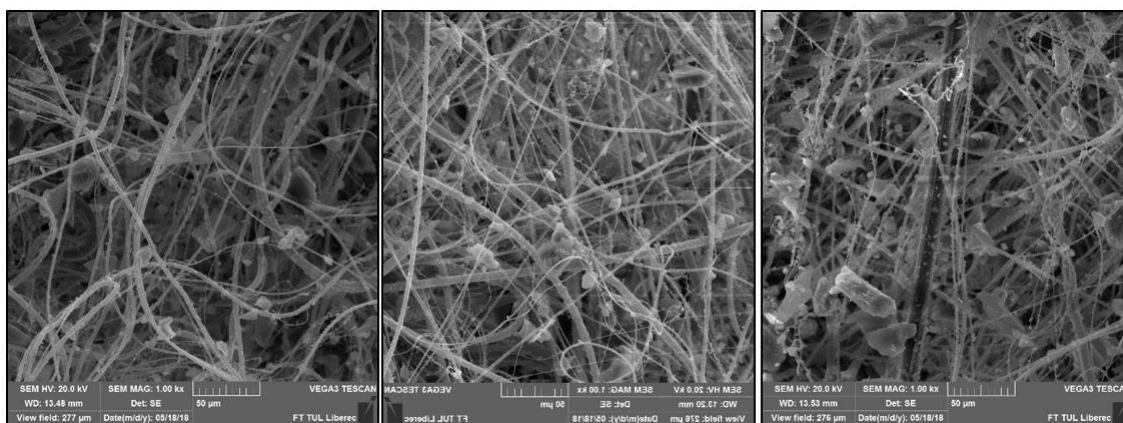
Průměry vláken byly měřeny na snímcích se zvětšením 1000x pro oba vzorky. Celkem bylo naměřeno 100 průměrů z obou vrstev, pro spolehlivější měření bylo měřeno ze tří snímků každého vzorku se stejným zvětšením. Z Obrázek 5 tabulky 5 je zřejmé, že průměry mikrovláken jsou téměř shodné a jejich průměry se při výrobách v různé dny nemění. Pro výpočet průměrů vláken nebyla potřeba úprava snímků. V programu Image J proběhlo pouze nastavení a kalibrace měřítka. Měření bylo prováděno ručně za pomoci příkazu *Measure*. Při měření bylo důležité dbát na to, aby žádné vlákno nebylo započítáno vícekrát než jednou.

Tabulka 5: Porovnání průměrů meltblownových vláken při výrobě vrstev s aktivním uhlím a bez něj

	MB+AC	MB + AC s AU
Průměr[μm]	8,366	8,524
Směrodatná odchylka [μm]	7,032	6,594
95 % interval spolehlivosti [μm]	<6,971; 9,761>	<7,216; 9,832>



Obrázek 22: Vlákenné vrstvy bez částic aktivního uhlí. Veškeré snímky jsou při zvětšení 1000x (měřítko 50μm)



Obrázek 23: Vlákenné vrstvy s inkorporovanými částicemi aktivního uhlí. Veškeré snímky jsou při zvětšení 1000x (měřítko 50μm)

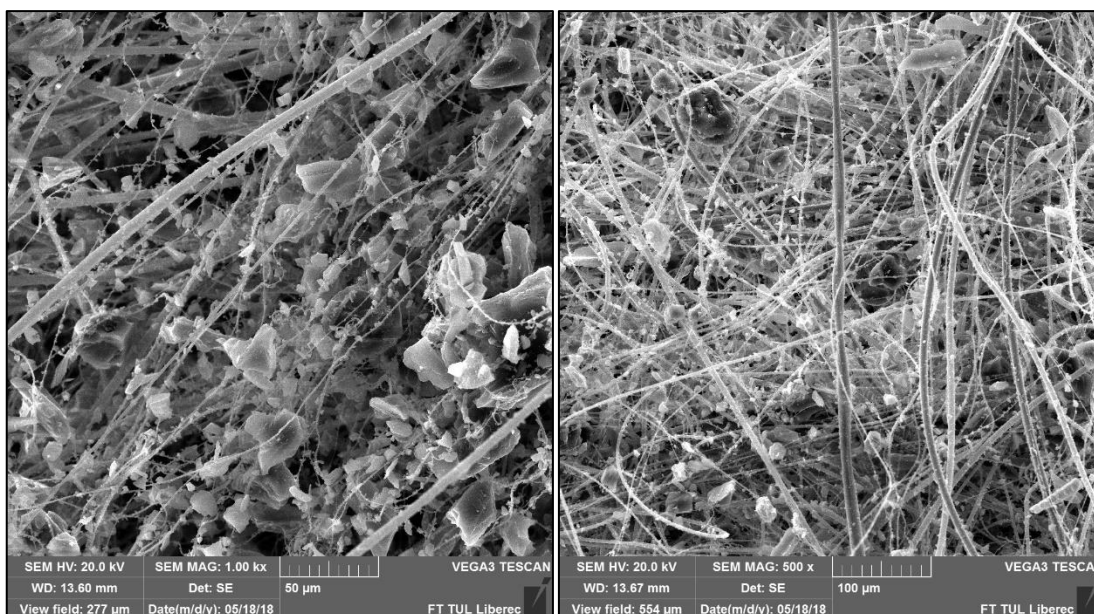
2. Rozložení aktivního uhlí a měření průměrné velikosti jeho částic

Pro měření plochy částic aktivního uhlí bylo použito několik snímků s různým zvětšením, proto při každém novém snímku bylo zapotřebí nastavit nové měřítko. Pro změření plochy jednotlivých částic bylo použito tlačítko *Freehand selection*, kterým byla obtáhnuta hranice aktivního uhlí a hodnota přidána do tabulky. Takto bylo změřeno 100 částic AU nejbliže ke kraji a uprostřed vzorku. Vzorky pro snímky AU nejbliže ke kraji byly získány i s vlákny obtisknutím terčíku s oboustrannou lepící páskou do textilie. Vzorky ze středu textilie byly naopak z textilie vystřiženy v objemnější vrstvě a přilepeny na terčíky oboustrannou lepící páskou. Obrázek 24 znázorňuje vyrobené vlákenné vrstvy s inkorporovaným aktivním uhlím, odebrané ze středu textilie. Obrázek 25 znázorňuje částice aktivního uhlí z kraje nosné textilie.

Ze snímků vrstev s aktivním uhlím, které byly odebrány ze středu textilie, je patrné rovnoměrné rozložení aktivního uhlí. Prášek aktivního uhlí se nenachází pouze na vrchní vrstvě, ale díky vrstvení při výrobě prostupuje celým jejím objemem. Z tabulky 6 je zřejmé, že v místech nejvíce ke kraji se nacházejí v průměru menší částice, což mohla zapříčinit manipulace se vzorkem a rozdílným způsobem aplikace vrstvy na terčík elektronového mikroskopu. Při manipulaci mohly větší a těžší částice propadnout mezi vlákna a zachytit se na podkladové vrstvě. Oproti tomu byl vzorek ze středu textilie téměř chirurgicky odebrán. Vyšší zastoupení větších částic aktivního uhlí lze také odvodit od způsobu výroby. Šířka naprašovacího zařízení nekorespondovala s šířkou podkladové textilie (podkladové textilie byly širší než naprašovací zařízení), proto lze uvažovat o dosažení větších dálek menších částic a jejich ukládání na krajích vzorku.

Tabulka 6: Průměrná velikost částic AU nejbliže ke kraji a ze středu textilie

	AU nejbliže ke kraji	AU ze středu textilie
Průměrná plocha částic [μm^2]	166,225	221,976
Směrodatná odchylka [μm^2]	198,408	172,974
95 % interval spolehlivosti [μm^2]	<133,242; 199,208>	<187,654; 256,298>



Obrázek 24: Vlákenná vrstva s inkorporovaným aktivním uhlím pro měření průměrné velikosti částic. Vzorek ze středu textilie Zvětšení 1000x, měřítko 50 μm.



Obrázek 25: Vlákenná vrstva s inkorporovaným aktivním uhlím pro měření průměrné velikosti částic. Vzorek nejvíce ke kraji. Zvětšení 1000x, měřítko 50 μm.

3.3 Kombinace dostupných vláknenných materiálů

Po sérii neúspěšného snažení bylo nutné změnit úhel pohledu a přistupovat k problému s jinou perspektivou, vzít výrobu vzorků z druhého konce. To znamená, že byly shromážděny netkané textilie různých technologií výroby, které představovaly hotové vrstvy, viz. Tabulka 7. Se snahou vytvořit vhodnou vrstvu pro sorbenty byly textilie na sebe logicky vrstveny, popsáno v tabulce 8. Pro vrstvený materiál bylo nutné najít kompromis mezi jeho objemností, možnou aplikací sorbentu a zachování jeho funkčnosti po aplikaci sorbentu. Dalšími požadavky na výsledný kompozit jsou: zachování vhodného omaku na vrchní vrstvě materiálu, dostatečná splývavost a dosažení vhodné prodyšnosti pro zachování komfortu při použití v textilním průmyslu.

Tabulka 7: Použité materiály

Typ materiálu-zkratka	Plošná hmotnost	Složení materiálu
Spunbond-SB	16 g/m ²	Polyetylen/Polypropylen
Meltblown-MB	150 g/m ²	Polypropylen
Vpichovaná NT-VP	80 g/m ²	Polyester
Struto-SVP	220 g/m ²	Polypropylen

Tabulka 8: Vrstvení materiálů pro vytvoření vhodného nosného materiálu pro sorbenty

Číslo vzorku	Složení kompozitu
1.	SB, MB, VP, SB
2.	SB, VP, MB, VP, MB, VP, SB
3.	SB,MB,VP,VP,MB,SB
4.	SB,VP,VP,SB
5.	SB,VP,SB,VP,SB
6.	SB,VP,SB,MP,SB,VP,SB
7.	Samostatné materiály
8.	VP,MB,VP
9.	SB,SVP,MB,VP,MB,SVP,SB
10.	SB,VP,MB,VP,SB

Důležité je nejen vrstvy vytvořit, ale najít i vhodný technologický postup pro jejich pojení. Po vyhotovení vrstev tedy bylo uvažováno, kterou technologií použít. Častou oblíbenou technologií pro pojení kompozitního materiálu je laminace, více popsána v kapitole 2.2.3, a proto bylo rozhodnuto začít právě s ní. Důležitými parametry procesu technologie je teplota, čas a tlak. Při vhodně zvolených parametrech lze získat velice dobrý kompozitní materiál, při nevhodně zvolených parametrech je možné vytvořit materiál, který je dobře laminovaný, ale své funkční vlastnosti ztrácí. Nesprávným

nastavením parametrů lze dojít až k delaminaci, kdy dochází k nedostatečnému propojení materiálů a jejich následnému oddělování.

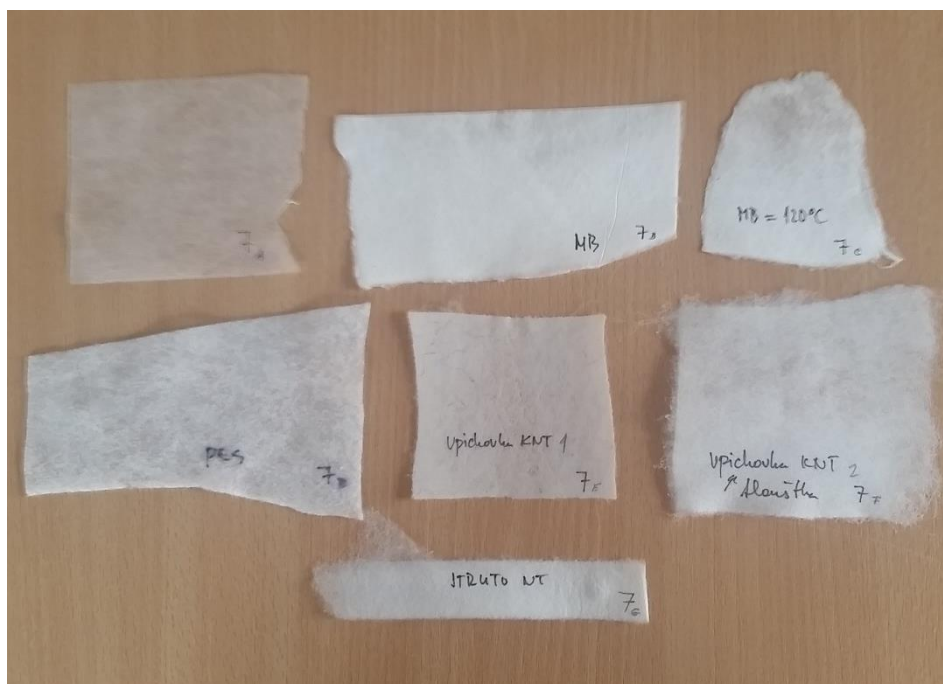
Pro experiment posloužil laminační stroj MEYER RPS-L 600. Přístroj disponuje šířkou dopravníku 600 mm a možností regulace teploty od 75 °C do 230 °C, rychlosti dopravníku 1-9 m/min a přítlaku 0-50 N/cm². Nejprve bylo nutné najít parametry pojení. Nejnižše tajícím polymerem je v našem případě polyetylen, který má teplotu tání udávanou v rozmezí od 110 °C do 140 °C. Z důvodu nalezení mezních teplot pro laminaci byla teplota záměrně nastavena na 100 °C a následně zvyšována až na 135 °C, viz. Tabulka 9. Experimentálně bylo zjištěno, že teploty nad 135 °C vedou k získání již nevhodných materiálů. Nejvhodnější nastavení se projevilo mezi 120-130 °C s rychlostí dopravníku 2,3 m/min, kdy docházelo k laminaci i objemnějších materiálů. Obrázek 26, Obrázek 27 a Obrázek 28 slouží k vizuální představě o vyrobených vzorcích.

Tabulka 9: Závislost pojení na teplotě

Teplota (°C)	Rychlost (m/min)	Laminace (ano /ne)
100	2,3	Ne
110	2,3	Ne
115	2,3	Ano
120	2,3	Ano
125	2,3	Ano
130	2,3	Ano
135	2,3	Ano



Obrázek 26: Laminované vzorky při teplotě $T = 130\text{ °C}$; 2,3 m/min; 14 sec: vzorky 1-6



Obrázek 27: Laminované dílčí materiály pro zhodnocení chování jednotlivých složek: 7A – SB; 7B – MB; 7C – MB (120 °C); 7D – VP; 7E – VP1; 7F – VP2; 7G – STRUTO



Obrázek 28: Laminované vzorky při teplotě $T = 130\text{ °C}$; 2,3 m/min; 14 sec: vzorek 8; Laminované vzorky při teplotě $T = 120\text{ °C}$; 2,3 m/min; 14 sec: vzorek 9; Laminované vzorky při teplotě $T = 113\text{ °C}$; 2,3 m/min; 14 sec: vzorky 10-11

Po laminaci bylo provedeno hodnocení na omak, které je velice subjektivní záležitostí a velkou mírou je ovlivněno citem hmatu hodnotitele. Dle hodnocení byly nejlepšími vzorky č. 1, 2, 4, 5; vzorek č.2 je však dle mého hodnocení nejlepší.

3.4 Výroba kompozitních materiálů s inkorporací aktivního uhlí

V předchozí kapitole byly vyráběny různé vrstvy z rozdílných materiálů a finálně zvolen jeden, který byl určen pro aplikaci sorbentu. Tento materiál byl vybrán zejména pro své vlastnosti a strukturu skládání vrstev. Vybraný produkt byl však upraven a vrstvy meltblownu byly nahrazeny vrstvami nanovláken vyrobené střídavým zvlákňováním. Nanovláknenné vrstvy byly vyrobeny docentem Pavlem Pokorným, který je také průkopníkem v oblasti střídavého zvlákňování. Nanovláknenný materiál byl připraven zvlákňováním 10 % (hmotnostní %) roztoku polyvinyl butyralu firmy Kuraray s průměrnou molekulovou hmotností 60.000 g/mol.

Polyvinyl butyral – PVB - $(C_8H_{14}O_2)_n$ je polymer známý zejména pro své mechanické vlastnosti jako je pevnost, pružnost a adhezi k jiným materiálům. PVB je čirý polymer, rozpustný v alkoholech, ketonech a esterech, využívaný především ve sklářském průmyslu, zaměřeném na průmysl automobilový. Vlastnosti tohoto polymeru se používají v adhesivní vrstvě mezi dvěma vrstvami skel. Jeho použitím se výsledný produkt stává bezpečnějším, při dopravní nehodě se sklo netříští na kusy, nýbrž zůstává ve formě popraskané tabule skla. Také při zasažení skla cizím předmětem absorbuje deformační sílu a nepropouští jej do další skleněné vrstvy.

3.4.1 Výroba laminovaných vrstev

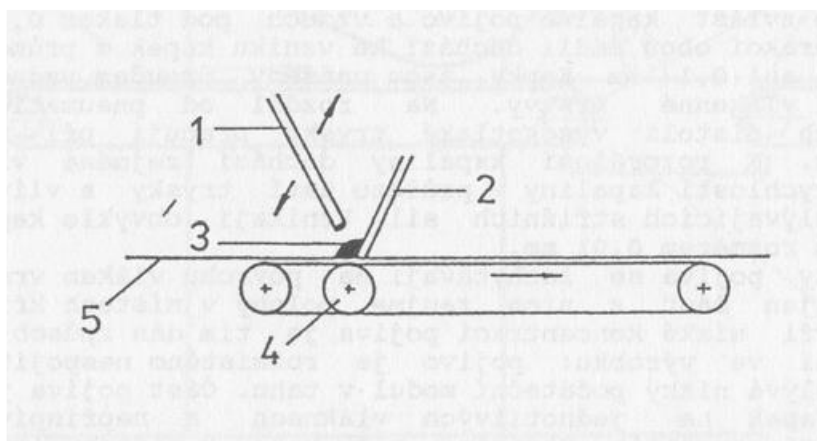
Pro výrobu prvních vrstev byly použity materiály popsané v tabulce 10. Na podkladovou spunbond textilií byla položena vpichovaná netkaná textilie, na ni nanovláknenná vrstva a na ni vpichovaná netkaná textilie s naprášeným aktivním uhlím. Na VP textilií s AU byly opět zrcadlově vrstveny netkané materiály, tedy nanovláknena, vpichovaná netkaná textilie a spunbond. V počátku výroby bylo použito kartáčové naprašovací zařízení pro nanášení aktivního uhlí (Obrázek 29). Samotné zařízení pracovalo bez problému, ovšem naprašování bylo velmi nestejně, a proto bylo nutné vymyslet jiný způsob nanášení. Do kádinky bylo odváženo potřebné množství aktivního uhlí a rovnoměrným sypáním povrstvena VP textilie, opatrným sypáním se částice aktivního uhlí nerozptylovaly do okolí. Vrstva aktivního uhlí potom byla ještě štětcem rozprostřena po celé ploše netkané textilie, později byl štětec nahrazen papírovou kartou formátu 85x55 mm. Takovému postupu nanášení se říká raklování a v textilním průmyslu se používá k nanášení pojiva a potiskování textilií, schéma procesu nanášení je znázorněno na obrázku 30.



Obrázek 29: Kartáčové naprašovací zařízení

Tabulka 10: Použité materiály

Typ materiálu-zkratka	Plošná hmotnost	Složení materiálu
Spunbond-SB	16 g/m ²	Polyetylen/Polypropylen
AC nanovlákná	50 g/m ²	Polyvinyl butyral
Vpichovaná NT-VP	80 g/m ²	Polyester

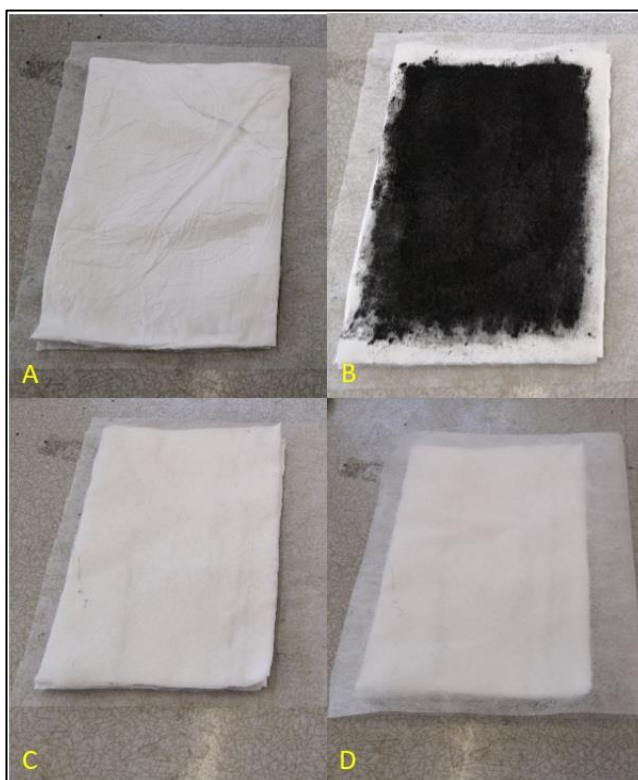


Obrázek 30: Schéma procesu nanášení raklí: 1- přívod pojiva, 2 -rakle, 3 -pojivo, 4 -dopravník, 5 -vlákenná vrstva

V průběhu první výroby byly vyrobeny kompozitní vrstvy o velikosti 220x150mm, složených z vlákných materiálů v tomto pořadí: SP, VP, AC, VP + aktivní uhlí, AC, VP, SB. Na vpichovanou netkanou textilií bylo manuálním raklováním nanášeno aktivní uhlí v postupném množství: 0,5g; 1 g; 1,5g; 2g; 2,5g; 3g, abychom zjistily jaké množství

aktivního uhlí je potřeba inkorporovat do VP pro dosažení správné funkčnosti kompozitu. Na obrázku 31 jsou zobrazeny dílčí kroky výroby kompozitní vrstvy.

Po zhotovení kompozitních vrstev je bylo nutné ještě zpevnit a ucelit. Kompozitní vrstvy byly zpevňovány laminováním při nastavených parametrech procesu: teplota byla nastavena na 130 °C, rychlost dopravníku 2,3 m/min a během laminace byl přítlak konstantně nastaven na 0 N. Výsledný kompozitní materiál, viz. Obrázek 32, měl trochu odlišné vlastnosti, než pro které byl vzorek č.2 z kapitoly 3.3 vybrán. Změna vlastností je připisována použitým nanovlákněným vrstvám z polyvinyl butyralu, který má při průměrné molekulové hmotnosti 50.000 g/mol teplotu tání v rozmezí 135-175 °C. Zjevně došlo k jeho částečnému natavení a ke změně tuhosti finálního kompozitního materiálu.



Obrázek 31: Skládání vlákněných vrstev. A) Vrstvy SB, VP a AC, B) Vrstvy SB, VP, AC, VP + aktivní uhlí, C) Vrstvy SB, VP, AC, VP + aktivní uhlí, AC, VP, D) Finální nezpevněná vrstva složená z SB, VP, AC, VP + aktivní uhlí, AC, VP, SB.



Obrázek 32: Výsledný kompozitní materiál po laminaci

3.4.2 Výroba vrstev pojených jinými technologiemi

Po otestování laminovaných vrstev ve Státním ústavu pro jadernou a chemickou obranu (SÚJCHBO) na rezistenci permeaci jódem nám bylo sděleno, že vrstvy s 3 gramy aktivního uhlí vycházely v testu nejlépe, a proto byla pro další testování a ověření předchozích testů vyrobena sada stejných laminovaných vrstev s navázkou 3 gramů aktivního uhlí. Při této příležitosti byly vyrobeny i další vrstvy stejným postupem jako doposud: SB, VP, AC, VP + AU, AC, VP, SB, o velikosti 220x150 mm. Na rozdíl od předešlých vrstev byly tyto vrstvy pojeny pomocí ultrazvuku, šití a technologie hot-melt. Stejným postupem byly vyrobeny i slepé vzorky, které neobsahovaly aktivní uhlí.

Pojení ultrazvukem – při pokusech pojit kompozitní vrstvu ultrazvukem bylo zjištěno, že se krycí spunbond vrstva (PE/PP) nepojí s vpichovaným netkaným materiálem (PES), což platí i při pojení pomocí laminace, kdy se vytváří “kapsa“. Pro lepší pochopení pojených materiálů byla vyzkoušena kombinace všech materiálů při pojení ultrazvukem. Jediné materiály, které nebylo možné pojit byla výše zmíněná bikomponentní spunbond textilie a vpichovaná netkána vrstva.

Šití – Další možností zpevnování a spojování vrstvených materiálů je klasické šití. Sešívání netkaných textilií není zrovna typickou technologií, používanou pro jejich spojování. Ve spojení s nanovláknny ji dokonce najít nelze. Nejčastěji používanými technologiemi pojení netkaných textilií je kalandrování, laminování, pojení ultrazvukem, a podobně. Šití je však důležitou technologií při výrobě oblečení, a proto je dobré jej vyzkoušet při možném spojování vrstev, neboť při výrobě oděvu bude šití nutné použít.

Kombinace šití a ultrazvuku – při šití takového materiálu je nutné dbát na zachování funkčnosti vrstev. Po průniku jehly materiálem se vytvoří díry větší, než je samotná nit, a snižují funkčnost vrstvy, tedy zvyšují možnost průchodu nebezpečných látek vytvořenými vpichy. Tady se nachází řešení pomocí pojení ultrazvukem. Prošitím vhodnou přízí je možné materiál dál pojit ultrazvukem, kdy dojde k roztavení příze a zacelení děr po průnicích jehly.

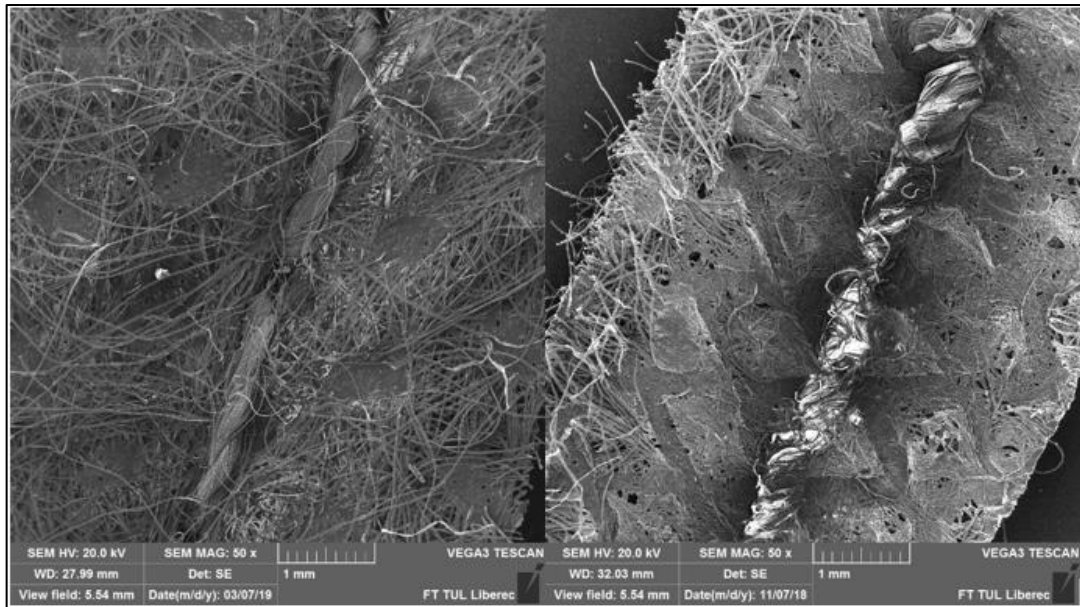
Vyrobené vrstvy byly prošívány na starém ruském stroji Čajka 142M. Stroj nebylo nutné nějak specificky upravovat nebo nastavovat, prvně však bylo prošívání vrstvy vyzkoušeno na zkušebním vzorku, aby nevhodným nastavením stroje nedošlo k deformaci vyrobených vrstev. Mechanické vlastnosti použité polyesterové příze je výrobcem specifikována v Tabulka 11: Specifikace nitě Hagal UNIPOLY 120. „Šicí nitě UNIPOLY jsou vyráběny z kvalitní polyesterové stříže. Jejich velkou předností je mnohostranné použití v konfekčním průmyslu. Speciální šicí doúprava umožňuje šití bez přetrhů na moderních vysokoobrátkových šicích strojích. Vynikají vysokou poměrnou pevností, jsou stálobarevné, odolné vůči oděru, bakteriím a plísním. Výroba je zajištěna s ohledem na ochranu životního prostředí a zdravotní nezávadnost.“ [41]

Tabulka 11: Specifikace nitě Hagal UNIPOLY 120 [41]

č. etiketní (jemnost TEX)	Průměrná pevnost v tahu - N	Poměrná pevnost - cN/tex	Průměrná tažnost při přetrhu - %
120 (14x2)	10,5	36,62	16,7

Po šití bylo nutné zacelit průniky po vpiších jehly. U technologie pojení ultrazvukem bylo postupováno stejně jako u prošívání vrstev. Nejprve bylo nutné vhodně nastavit parametry procesu a vyzkoušet je na zkušebním vzorku. Bylo zjištěno, že nesprávným nastavením je možné proříznout materiál a znehodnotit pojené místo. Technologie pojení ultrazvukem má také svá omezení, co se tloušťky materiálu týká. Použitím objemnějších

materiálů není stroj schopný posouvat materiál a pojit jej v požadované délce. Pro pojení byla použita reliéfní sonotroda o výkonu 15,5 %, rychlosti posunu 2,5 m/min, tlaku 2 barů a vzdálenosti 0,8 cm. Na obrázku 33 je vidět struktura šitého spoje před a po použití ultrazvuku.



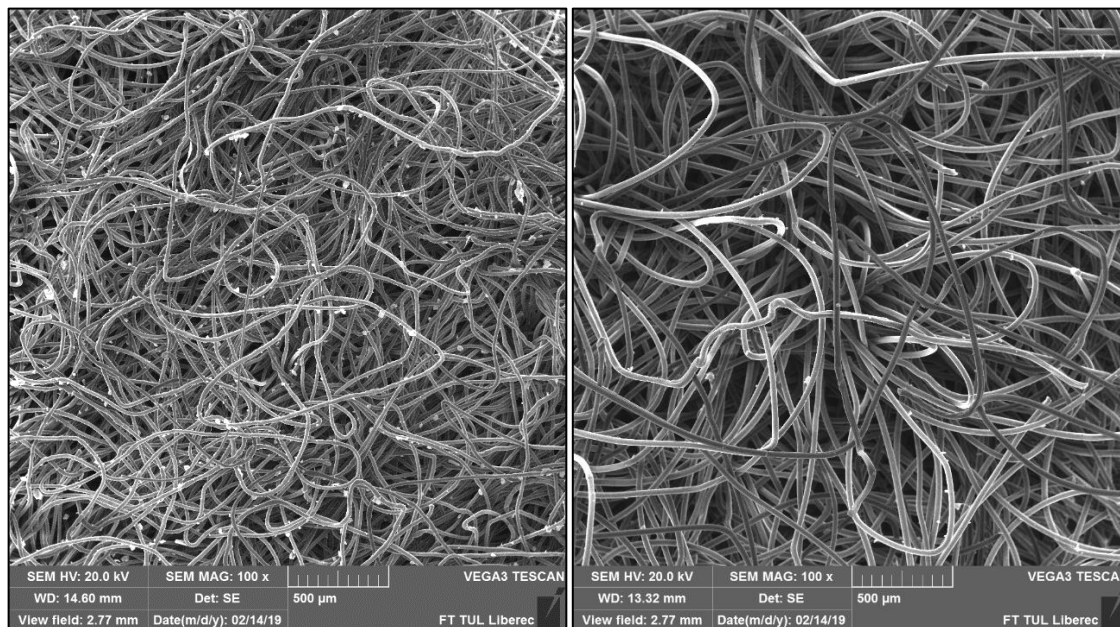
Obrázek 33: Struktura šitého spoje před a po použití pojení pomocí ultrazvuku

Hot-melt pojení – pro pojení pomocí hot-melt technologie byl použit polymer s názvem Helmitin® 42048 patřící do skupiny amorfních poly-alfa-olefinů. Polymer se vyznačuje flexibilitou a odolností proti vlhkosti a prachu. Bod měknutí se nachází na hranici 112 °C, doporučená aplikační teplota v rozmezí od 130-200 °C. Polymer byl aplikován na každou vrstvu pomocí stříkací pistole od Reka Klebetechnik s označením TR 80 LCD s konstantně nastavenými tlaky stlačeného vzduchu (3 bary) a teplotou 130 °C. Dílčím krokem tedy bylo nanést polymer na textilní vrstvu, na kterou byla manuálně přidána další vrstva. Vrstvením a aplikací polymerního lepidla mezi vrstvy byl vyhotoven celý vzorek.

Lisování – poslední technologií použitou pro pojení vrstev bylo lisování. Lisovací desky byly nastaveny na 130 °C, totožně s laminací. Vzdálenost desek od sebe byla nastavena na 0,8 cm. Již po zkušenosti s laminací bylo předpokládáno, že dojde k natavení nanovláken a zhoršení komfortních vlastností materiálu. Při lisování však nedošlo k roz-tavení nanovláken, nýbrž k jejím smrštění a došlo tak k deformaci a zvlnění celého vzorku.

3.5 Morfologie vláknenných materiálů a částic aktivního uhlí

V kapitole jsou zobrazeny obrázky vláknenných vrstev a částic aktivního uhlí, pořízených na snímacím elektronovém mikroskopu.

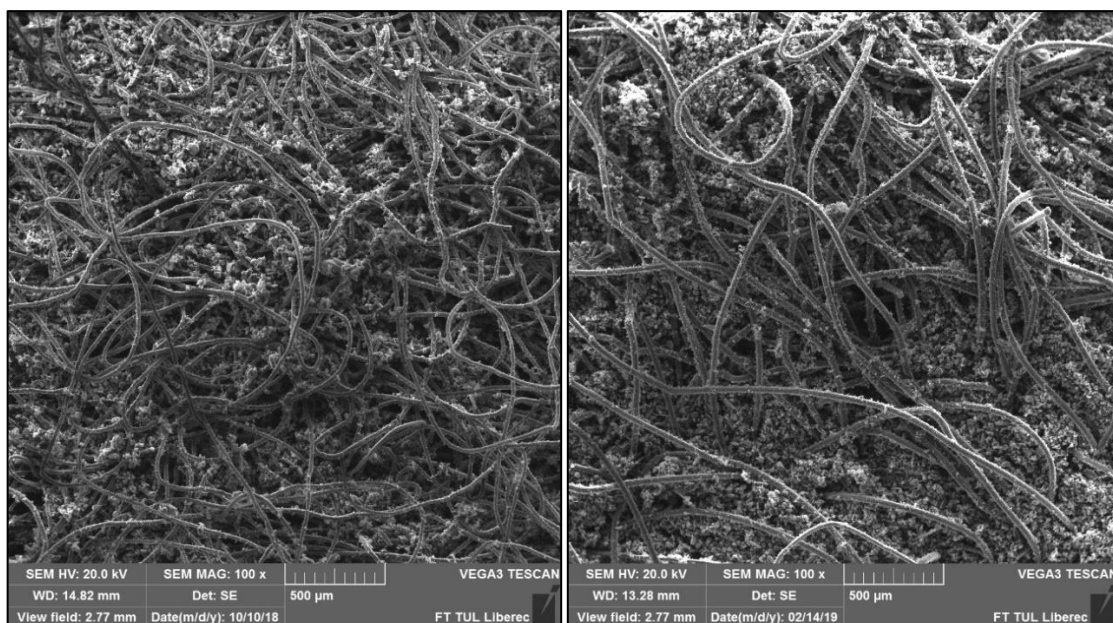


Obrázek 34: Polyesterová (vlevo) a polypropylenová (vpravo), vpichováním zpevněná, netkaná vrstva při zvětšení 100x (měřítko 500 μm).

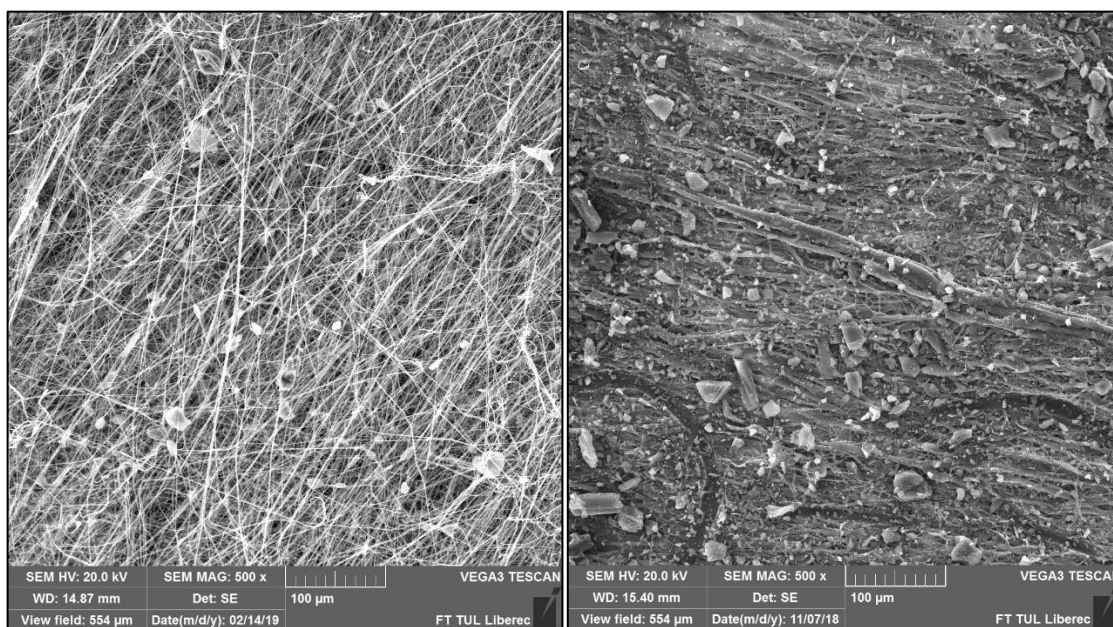
Na Obrázek 34 jsou zobrazeny polyesterové a polypropylenové netkané vrstvy. Z každého snímku bylo provedeno sto měření průměru vlákna a spočítána průměrná hodnota. Polypropylenová netkaná textilie byla pro výrobu vzorků používána až později při měření závislosti prodyšnosti a paropropustnosti na množství aktivního uhlí. V tabulce 12 jsou naměřené průměrné velikosti vláken. Pro porovnání jsou na obrázku 35 znázorněny netkané vrstvy s inkorporovanými částicemi aktivního uhlí.

Tabulka 12: Průměrná velikost polyesterových a polypropylenových vláken

Materiál	Průměrná velikost vlákna [μm]	Směrodatná odchylka [μm]	95 % interval spolehlivosti [μm]
PES	20,63	3,07	<19,28; 21,98>
PP	30,71	3,41	<29,49; 31,93>



Obrázek 35: Inkorporované částice aktivního uhlí do netkaného materiálu z polyesteru (vlevo) a polypropylenu (vpravo) metodou raklováním. Zvětšení 100x (měřítko 500 μm).

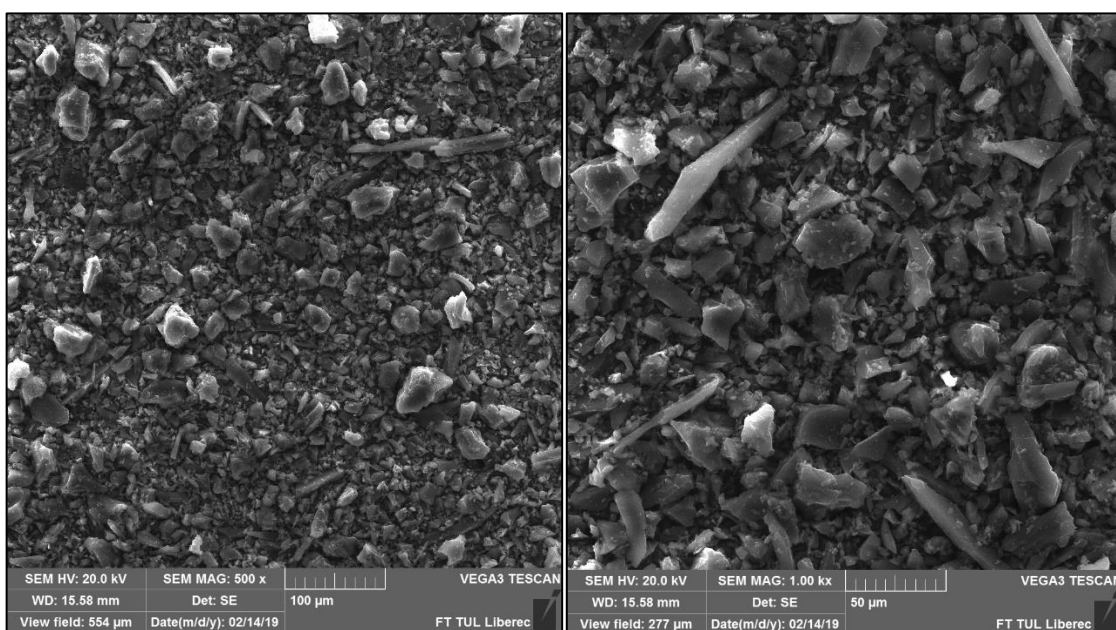


Obrázek 36: Nanovlákná vrstva před laminací (vlevo) a po laminaci (vpravo) při zvětšení 500x (měřítko 100 μm).

Tabulka 13: Průměrná velikost nanovláken

Materiál	Průměrná velikost vlákn [nm]	Směrodatná odchylka [nm]	95 % interval spolehlivosti [nm]
Nanovlákná	673	251	<654; 692>

Na obrázku 36 je vidět nanovlákněná vrstva před laminací a po laminaci. Na obou snímcích jsou patrné částice aktivního uhlí, které nejsou inkorporovány do materiálu, ale jsou pouze na něm. Vrstvy byly preparovány z měřených vzorků, a právě proto se pár částic aktivního uhlí na vzorku zachytilo. Na obrázku nanovlákněné vrstvy po laminaci lze pozorovat, že při laminaci došlo k natavení nanovláken a snížení pórovitosti materiálu. Na druhou stranu je zde dobře vidět, že laminací nanovlákněná přilnou k nosné vrstvě s aktivním uhlím (vyražená vlákna v nanovlákněné vrstvě po laminaci). Ze snímků nanovlákněné vrstvy před laminací byla měřena průměrná velikost vlákna, výsledky jsou v tabulce 13. Průměr vláken se pohybuje v rozmezí od 216 do 1400 nm.



Obrázek 37: Částice aktivního uhlí při zvětšení 500x (vlevo – měřítko 100 µm) a při zvětšení 1000x (vpravo – měřítko 50 µm)

Na obrázku 37 lze vidět částice aktivního uhlí, které se svou velikostí pohybují od nanometrů až po stovky mikrometrů. Jelikož částice aktivního uhlí nejsou symetrické, jejich měření je proto obtížné. Obrázek nám sice ptačí perspektivou ukazuje největší rozměr částice, avšak nevíme, zda se největší rozměr nenachází právě z jiného úhlu pohledu. Proto částice nebyly nijak měřeny.

3.6 Testování vyrobených vzorků

Vzorky byly testovány na úbytek částic, prodyšnost a paropropustnost pro zjištění komfortních vlastností textilie. Vyrobene vzorky byly také odeslány na testování do Státního ústavu jaderné, chemické a biologické obrany, kde byly testovány na rezistenci proti chemickým bojovým látkám.

3.6.1 Statická zkouška úbytku částic aktivního uhlí

Úbytek částic aktivního uhlí bylo měřeno na přístroji, umístěném v budově CxI Technické univerzity v Liberci. Principem technologie tohoto statického měření je upnutí vzorků do testovací hlavy o velikosti 20 cm² s následným působením podtlaku a danou rychlostí proudu vzduchu. Nejprve však bylo nutné vybrat konstantní testovací hodnotu. U všech vzorků byla nastavena konstantní rychlost proudu vzduchu na 0,2 mm/s, s měněním se podtlakem, který se mění právě pro dosažení konstantní rychlosti proudu vzduchu. Před a po testování byly vzorky váženy na váze s přesností na tři desetinná místa. Vzorky byly podrobeny nastaveným parametrům po dobu jedné minuty. Vzorky pojené pomocí laminace jsou pojmenovány jako laminát, vzorky pojené hot-melt technologií jako hot-melt a vzorky zpevněné šitím a ultrazvukem jako ultrazvuk. V tabulce 14 jsou potom zapsány hodnoty z měření.

Tabulka 14: Úbytek částic aktivního uhlí při statické zkoušce

Materiál	Podtlak [Pa]	Před měřením [g]	Po měření [g]	Úbytek [g]
Laminát	17 000	15,083	14,720	0,363
Hot-melt	4 000	31,317	31,282	0,035
Ultrazvuk	3 300	17,616	17,587	0,029

Parametry testování úbytku částic byly nastaveny dá se říci na extrémní hodnoty, neboť je zcela jisté, že takové parametry při reálném nošení nenastanou. I při tak velkém zatížení ale došlo k minimálnímu úbytku částic. K největšímu úbytku částic došlo u Laminátu, který má laminováním sníženou poróznost nanovláken. Tím, že byla nastavena konstantní rychlost vzduchu, u Laminátu musela být nastavena vysoká hodnota tlakového spádu. Nápor vzduchu na částice byl potom tak velký, že byl dost silný protlačit částice aktivního uhlí i skrze malé póry, které se velkým tlakem částic deformují - roztahují. Nepatrně vyšší hodnota je i u vzorku hot-melt, kde je také snížena pórovitost aplikovaným pojídlem.

3.6.2 Dynamická zkouška úbytku částic aktivního uhlí

Dynamická zkouška byla provedena na třepacím zařízení Heidolph Vibramax 100, které je primárně určené pro třepání zkumavek, lahví a Erlenmeyerových baněk. Přístroj vykonává horizontální kruhový pohyb s plynulou regulací frekvence třepání při rozsahu 150-1350 kmitů za minutu. Pro testování úbytku částic byly použity vzorky Laminát, Hot-melt a Ultrazvuk, frekvence třepání byla nastavena na 1050 kmitů po dobu 10 minut. V tabulce 15 jsou zaznamenané hodnoty naměřené při testování.

Tabulka 15: Úbytek částic aktivního uhlí při statické zkoušce

Materiál	Před měřením [g]	Po měření [g]	Úbytek [g]
Laminát	15,149	15,096	0,053
Hot-melt	29,732	29,696	0,036
Ultrazvuk	18,813	18,782	0,031

Oproti statickému testování úbytku částic, kde byl měřen úbytek částic na ploše 20 cm², byl při dynamickém měření úbytku částic měřen celý vzorek o velikosti 330 cm². Vzorky nebyly po krajích žádným způsobem zalepeny, a proto se aktivní uhlí mohlo při třepání dostat mimo vzorek přes kraje vzorku, a mohlo tak dojít k většímu vyprašování, zobrazeno na obrázku 38. I při takovém nedostatku však došlo k minimálnímu úbytku aktivního uhlí.



Obrázek 38: Dynamické testování úbytku částic aktivního uhlí

3.6.3 Prodyšnost

Materiály byly testovány na prodyšnost pomocí přístroje SDL Atlas M021A. Měření bylo prováděno v laboratořích budovy CxI Technické univerzity v Liberci dle normy ČSN EN ISO 9237 s doporučenými zkušebními podmínkami: měřicí plocha 20 cm² a tlakový spád 200 Pa. Naměřené hodnoty prodyšností pro vzorky se 3 gramy aktivního uhlí a bez aktivního uhlí jsou zapsány v tabulce 16. Spolu se vzorky byla proměřena i armádní bunda s označením FOP-96, která se skládá ze tří částí – podšívka, vpichovaná textilie s dispergovaným aktivním uhlím a vrchní tkaný materiál. Na internetových stránkách výrobce lze dohledat vlastnosti výrobku, prodyšnost materiálu zde udávají větší než 100 l/m²/s. Naměřená prodyšnost potom byla větší než 200 l/m²/s.

Tabulka 16: Prodyšnost vzorků se 3 gramy aktivního uhlí a bez něj

Materiál	S částicemi AU [l/m ² /s]	Bez částic AU [l/m ² /s]
Laminát	4,9	5,6
Hot-melt	20,3	26,3
Ultrazvuk	16,8	20

Z tabulky 16 je zřejmé, že nejlepší průchod vzduchu nastal u vzorku hot-melt, nejhorší potom u laminátu. Aplikováním pojivého polymeru u hot-melt vzorků byly vytvořeny distanční mezery, které jak je vidět zlepšují prodyšnost materiálu. Nejhorší průchod vzduchu nastává u laminátu. Bližším zkoumáním bylo zjištěno, že se laminací při 130 °C taví nanovlákná, která vytváří téměř jednolitý textilní materiál a jeho propustnost vzduchu tak klesá. Vyšší hodnoty prodyšnosti však neznamenaají lepší vlastnosti materiálu, jak by se na první pohled mohlo zdát. Hodnoty určují množství propustnosti vzduchu, a vyšší hodnoty tedy vykazují nižší odolnost proti větru. Pro materiály vyráběné se zaměřením na filtraci je vyšší prodyšnost žádoucí, pro oblečení však nikoliv. Firma Faramugo, zabývající se outdoorovým oblečením se na svém blogu zmiňuje, že materiály s hodnotami prodyšnosti kolem 10 l/m²/s jsou prakticky už 100 % větru odolné [42].

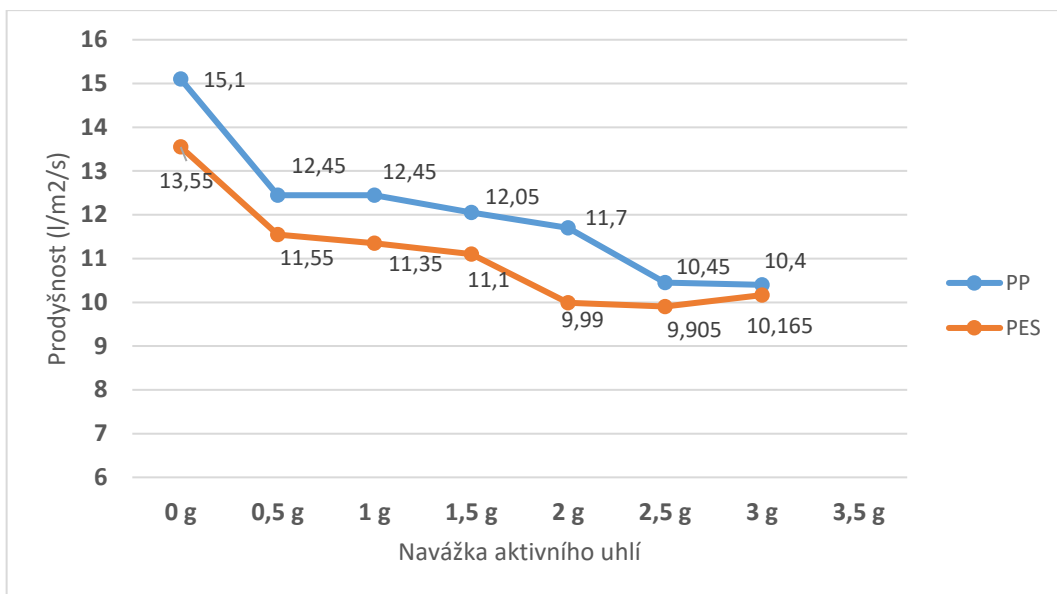
3.6.3.1 Závislost prodyšnosti na množství aktivního uhlí

Stejně jako samotná prodyšnost, tak i závislost prodyšnosti na množství aktivního uhlí byla měřena na přístroji SDL Atlas M021A, umístěného v laboratořích budovy CXI. Měření bylo prováděno dle normy, zmíněné v kapitole 3.4.4 Prodyšnost. Aby bylo měření závislosti co nejméně ovlivněno, vzorky se skládaly pouze z pěti vrstev: SB, AC, VP+AU, AC, SB. Vzorky byly vyrobeny ve dvou sadách. Jedna sada byla vyrobena s nosnou netkanou textilií vyrobenou z polyesteru, vzorek pojmenován jako Polyester, která měla plošnou hmotnost 80 g/m². Druhá sada byla vyrobena s nosnou textilií vyrobenou z polypropylenu, vzorek označen jako Polypropylen, o plošné hmotnosti 150 g/m². Prodyšnost byla měřena na vzorcích s aktivním uhlím i bez něj. Navážka aktivního uhlí byla zvyšována po půl gramu od nuly do mezní hodnoty, kdy už nebylo možné nanést více aktivního uhlí. Naměřené hodnoty byly zapsány do tabulky 17 a z průměrů měření pak byl vyhotoven graf znázorněn na obrázku 39.

Tabulka 17: Závislost prodyšnosti na množství aktivního uhlí

Navážka aktivního uhlí	Polyester			Polypropylen		
	1.měření [l/m ² /s]	2.měření [l/m ² /s]	Průměr [l/m ² /s]	1.měření [l/m ² /s]	2. měření [l/m ² /s]	Průměr [l/m ² /s]
0 g	13,6	13,5	13,55	15	15,2	15,1
0,5 g	11,5	11,6	11,55	12,6	12,3	12,45
1 g	11,4	11,3	11,35	12,4	12,5	12,45
1,5 g	11,4	10,8	11,1	12	12,1	12,05
2 g	9,58	10,4	9,99	11,5	11,9	11,7
2,5 g	10	9,81	9,905	10,7	10,2	10,45
3 g	10,4	9,93	10,165	10,6	10,2	10,4
3,5 g	x	x	x	9,11	9,03	9,07

Z grafu na obrázku 39 je zřejmé, že počáteční přidání pouhého půl gramu aktivního uhlí nejvíce ovlivňuje prodyšnost vzorků. Stupňování navážky aktivního uhlí potom vykazuje místy až téměř lineární závislost. Se zvyšujícím množstvím aktivního uhlí se snižuje prodyšnost vzorků, což nutně neznamená horší vlastnosti, ale naopak to vykazuje vyšší odolnost vůči pronikání větru a snížení rychlosti průniku chemických bojových látek. Z grafu jsou zřejmé malé výchylky, které mohou být ovlivněny manuálním nanášením částic aktivního uhlí a jejich nestejně rozprostření na nosné vrstvě.



Obrázek 39: Graf závislosti prodyšnosti na množství aktivního uhlí

3.6.4 Paropropustnost

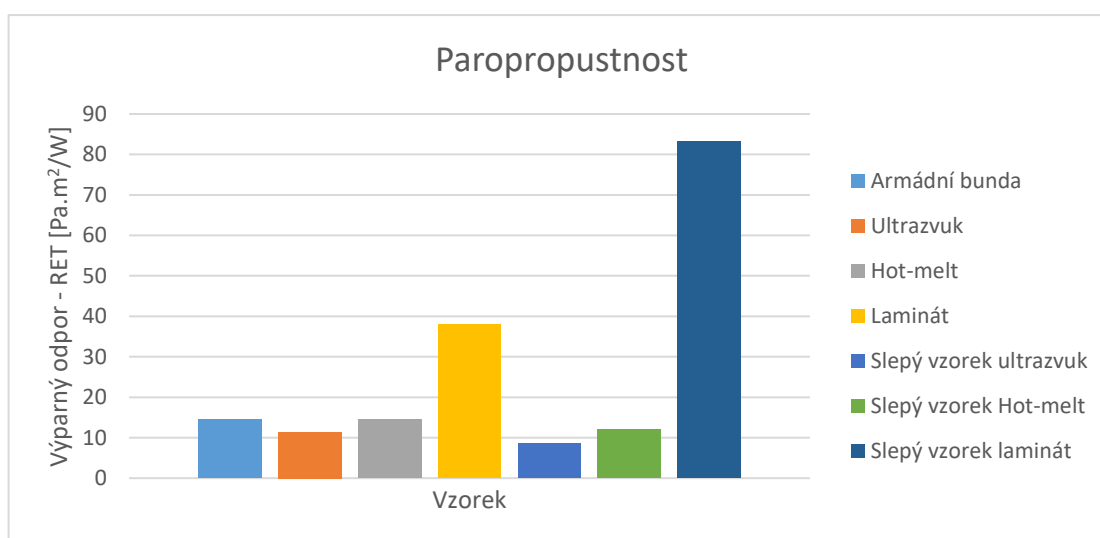
S prodyšností jde ruku v ruce i paropropustnost, což je schopnost materiálu odvádět vodní páry pryč od těla. Vyšší prodyšnost materiálu však neznamena lepší paropropustnost, což bylo dokázáno při testování vzorků. Měření bylo provedeno na přístroji Permetest, umístěného na katedře Hodnocení textilií, patřící pod textilní fakultu Technické univerzity v Liberci. Všechna teorie k přístroji je popsána v kapitole 2.4.2 Permetest. Pro měření paropropustnosti byly použity vzorky Hot-melt, Laminát a Ultrazvuk, tedy vzorky o sedmi vrstvách. S ohledem na velikosti vzorků bylo měření provedeno pouze dvakrát na každém vzorku. Měřená oblast se nesmí nijak překrývat s již naměřeným místem, neboť by došlo k ovlivnění měření. Pro lepší pochopení a posouzení materiálu je v tabulce 18, hodnotami MVTR i RET, uvedeno hodnocení textilií z hlediska paropropustnosti. Průměrné hodnoty potom byly zapsány do tabulky 19.

Tabulka 18: Hodnocení paropropustnosti z hlediska RET i MVTR

Hodnota Ret [Pa.m ² /W]	Slovní ohodnocení	Hodnota MVTR [g/m ² x 24 hodin]
6 a méně	velmi dobrá	nad 20 000
6 až 13	Dobrá	9 000 - 15 000
13 až 20	Uspokojivá	5 000 – 9 000
20 a více	Neuspokojivá	pod 5 000

Tabulka 19: Průměrné hodnoty z měření paropropustnosti

Materiál	Výparný odpor-RET [Pa.m ² /W]	Relativní propustnost pro vodní páry [%]
Armádní bunda	14,4	28,6
Ultrazvuk	11,4	32,9
Hot-melt	14,5	28,5
Laminát	38	13,3
Slepý vzorek ultrazvuk	8,5	40,2
Slepý vzorek Hot-melt	12	32,3
Slepý vzorek laminát	83,3	6,5



Obrázek 40: Graf naměřených hodnot paropropustnosti pro jednotlivé vzorky.

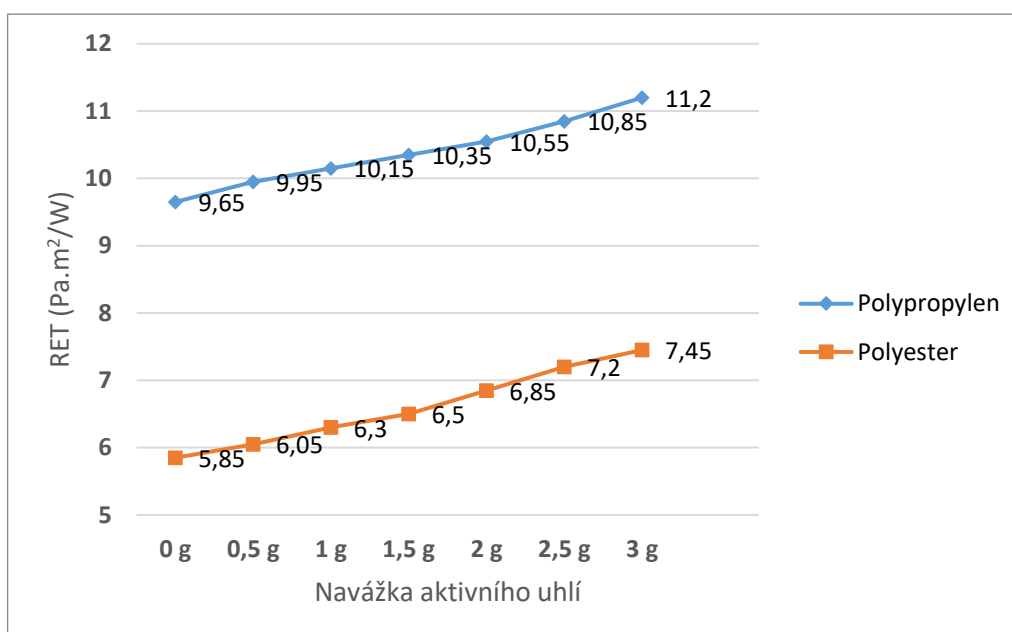
Z grafu na obrázku 40 jsou zřejmé jisté výkyvy, které nastaly u vzorku Laminát, neboť je zcela jisté, že u slepého vzorku by měla být hodnota RET nižší, stejně jako tomu bylo u slepého vzorku Ultrazvuk nebo Hot-melt. Jak je vidět, Laminát je tak či tak nepropustný pro vodní páry, a proto by byl pro použití do oděvního průmyslu velmi nevhodný. Lepších výsledků dosahuje vzorek Hot-melt, který se se svojí hodnotou RET sice přibližuje vzorku Armádní bundy, avšak hodnotu převyšuje. Nejlépe se při měření paropropustnosti projevil vzorek Ultrazvuk, který je hodnotou RET dokonce o několik jednotek nižší a poskytoval by tak lepší komfortní vlastnosti. Při porovnání výsledků s tabulkou 19 lze zjistit, že vzorek ultrazvuk dokonce spadá do o stupeň lepšího komfortního oddílu než armádní bunda.

3.6.4.1 Závislost paropropustnosti na množství aktivního uhlí

Závislost paropropustnosti na množství aktivního uhlí bylo měřeno na přístroji Permtest. Použité vzorky pro měření byly stejné jako pro měření závislosti prodyšnosti na množství aktivního uhlí, tedy vzorky Polyester a Polypropylen. Paropropustnost byla měřena na vzorcích s aktivním uhlím i bez něj. Navážka aktivního uhlí byla zvyšována po půl gramu od nuly do třech gramů, kdy už množství aktivního uhlí v materiálu dosahovalo mezní hodnoty. Naměřené hodnoty byly zapsány do tabulky 20.

Tabulka 20: Závislost paropropustnosti na množství aktivního uhlí

	Polypropylen [Pa.m ² /W]	Polyester [Pa.m ² /W]
bez AU	9,65	5,85
0,5 g	9,95	6,05
1 g	10,15	6,3
1,5 g	10,35	6,5
2 g	10,55	6,85
2,5 g	10,85	7,2
3 g	11,2	7,45



Obrázek 41: Graf závislosti paropropustnosti na množství aktivního uhlí

Z grafu na obrázku 41 je zřejmé, že mnohem lepších hodnot dosahuje vzorek Polyester, který má při inkorporování 3 g částic aktivního uhlí paropropustnost blízká 8 Pa.m²/W, což je hodnota srovnatelná s hodnotami oblečení pro sportovní účely. Ani vzorek Polypropylen však nevykazuje nepříznivé hodnoty. Vzorek má sice podobné hodnoty jako vzorek Ultrazvuk z předešlého měření, avšak u vzorku Polypropylen došlo ke

snížení plošné hmotnosti. Z grafu je také zřejmá téměř lineární závislost paropropustnosti na množství aktivního uhlí.

3.6.5 Odolnost vzorků proti pronikání bojových chemických látek

Jak je zmíněno na začátku kapitoly 3.6 Testování vyrobených vzorků, vzorky byly zasílány do Státního ústavu jaderné, chemické a biologické obrany v Brně, kde byly podrobeny testům na průnik škodlivých látek a jeho netoxickým náhradám. Hodnocení odolnosti vzorků se řídí normou ČSN EN 16523-1 a 16523-2. Hodnotícím kritériem je zvolena hodnota permeační rychlosti $F = 1 \mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}$. V případě bojových chemických látek lze jako kritérium použít i nižší permeační rychlost $F = 0,1 \mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}$ ¹. Dříve bylo dle normy ČSN EN ISO 6529 možné zvolit permeační rychlost v rozmezí mezi $F = 1$ a $0,1 \mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}$. Dnes platné normy ČSN EN 16523-1 a 16523-2 uvádějí primární permeační rychlost $F = 1 \mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}$ [43,44]. Některé jiné normy, například norma ASTM F739, pracují i s hodnotou $0,1 \mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}$ [45]. Minimální požadovaná hodnota pro odolnost vůči průniku chemických bojových látek byla stanovena na 180 minut. V jednotlivých kapitolách jsou popsány postupy při měření a výsledky testů.

Použitá činidla pro testování:

- Jód (I) je chemický prvek, charakteristický svým dráždivým zápachem a fialovou až černou barvou. Jód při normálním atmosférickém tlaku přechází do plynného skupenství, a proto se při testování také používá jako netoxické činidlo [46].
- Dimethyl methylfosfonát ($\text{C}_3\text{H}_9\text{O}_3\text{P}$) se pro svou podobnost těkavosti a rozpustnosti ve vodě běžně používá při testování materiálů jako netoxická náhrada za soman nebo sarin, což jsou vysoce toxické látky [47].
- Soman ($\text{C}_7\text{H}_{16}\text{FO}_2\text{P}$), též označovaný jako GD, je nervově paralytický plyn. Pokud se nachází v čisté podobě, je bez barvy a bez zápachu. Často má však žlutou až hnědou barvu, jehož zápach se podobá kafru [48].
- Sarin ($\text{C}_4\text{H}_{10}\text{FO}_2\text{P}$), jinak také označovaný jako GB, je nervově paralytická kapalná chemická zbraň. Bez příměsí je to čirá kapalina bez zápachu. V nečisté podobě je z něj cítit hořčice nebo spálená guma [48].
- 1,6-dichlorhexan ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{Cl}_2$) se používá při testování jako netoxická náhrada yperitu.

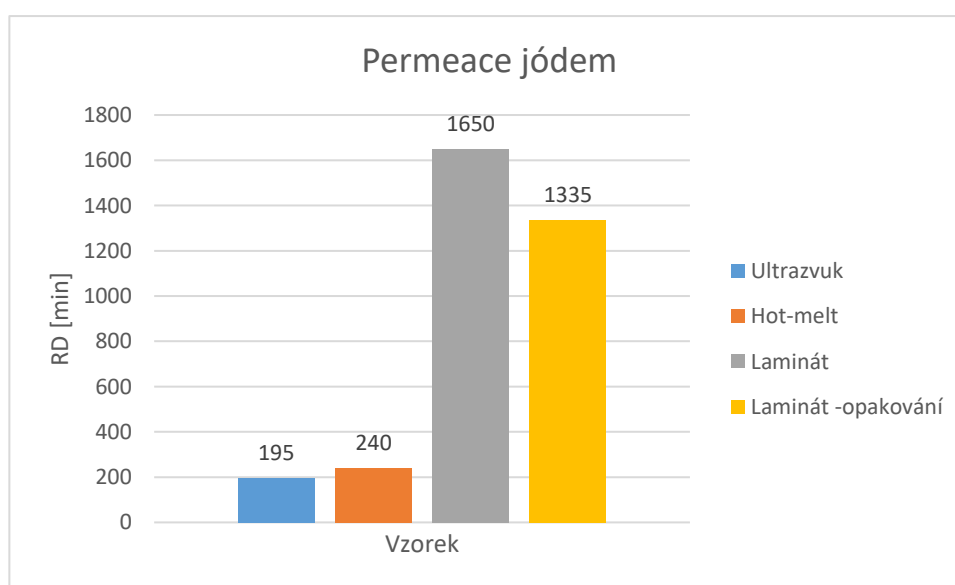
- Yperit ($C_4H_8Cl_2S$), patří do bojových látek, projevující se leptáním sliznic a tvorbou puchýřů. Je to bezbarvá olejovitá látka, jejíž účinky se urychlují ve vlhkém prostředí. Zápach tohoto plynu připomíná česnek, křen spálenou gumu nebo nejčastěji hořčici, proto se mu také říká hořčičný plyn [49].

3.6.5.1 Odolnosti vzorků proti pronikání jódu

Pronikání jódu je první metodou testování, neboť je nejjednodušší a nejrychleji vypovídající technikou stanovení odolnosti materiálu. Zkouška ve své podstatě není složitá, ovšem je i tak náročná na čas, neboť po složení aparátu je důležité v daných časových intervalech sledovat změny na indikačním roztoku. Materiály byly měřeny v SÚJCHBO, výsledky jsou znázorněny v tabulce 21. Na obrázku 43 je znázorněné testování pomocí Jodotestu.

Tabulka 21: Výsledky měření odolnosti vzorků proti pronikání jódu

Vzorek	Tloušťka [mm]	RD [min]	Hmotnost-před měřením [g]	Hmotnost-po měření [g]	Přivažek [g]
Ultrazvuk	3,684 ± 0,048	195	0,956	1,007	0,051
Hot-melt	4,819 ± 0,070	240	1,780	1,880	0,1
Laminát	2,413 ± 0,037	1650	0,959	1,136	0,177
Laminát - opakování	2,570 ± 0,034	1335	1,099	1,156	0,057



Obrázek 42: Graf naměřených hodnot při permeaci jódem

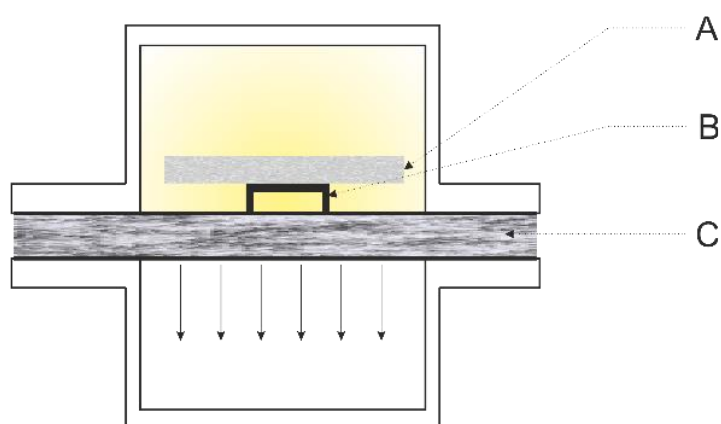


Obrázek 43: Aparatura Jodotestu po testování vzorku

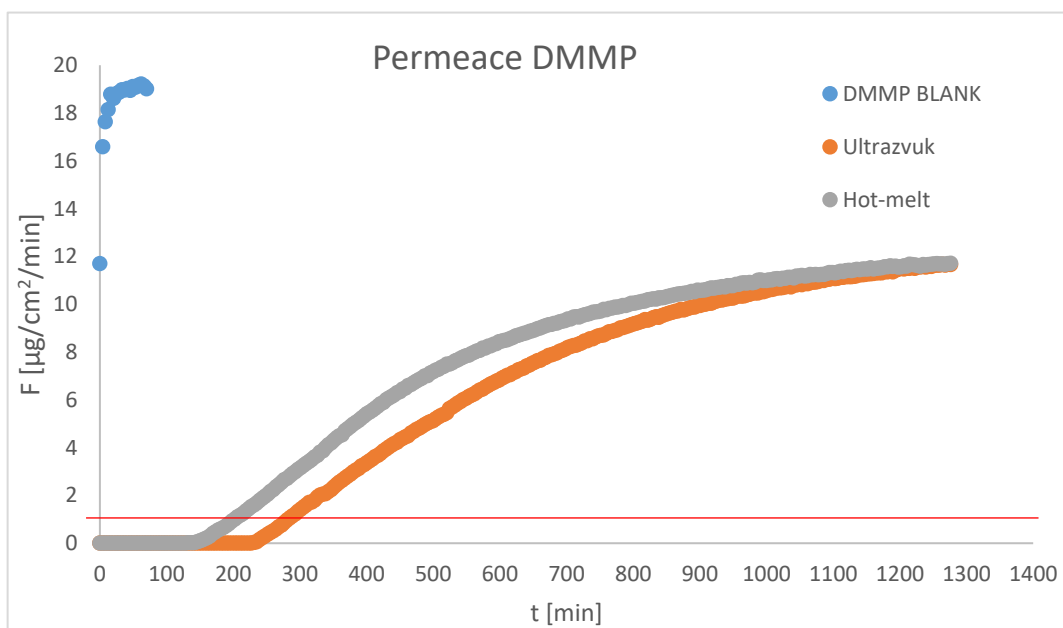
Graf na obrázku 42 s jistotou říká, že nejlepší rezistenci vůči permeaci jódem má laminovaný vzorek, který měl tak vysoké hodnoty, že byl vyroben a proměřen s opakováním pro ověření správnosti testování. S ohledem na nekomfortní vlastnosti Laminátu, při případném použití do oděvů byl však vyřazen z dalšího testování pro prostup CWA. Vzorek Ultrazvuk i Hot-melt splňují nejnižší požadovanou hodnotu rezistenční doby, která byla stanovena na 180 minut. Ačkoliv má vzorek Hot-melt vyšší rezistenční dobu, tak s ohledem na plošnou hmotnost a ostatní vlastnosti materiálu, je lepší vzorek Ultrazvuk.

3.6.5.2 Odolnosti vzorků proti pronikání dimethyl methylfosfonátu (DMMP)

Testovanými materiály byly vzorky Hot-melt a Ultrazvuk. Měření bylo provedeno za statických podmínek při 25 °C na přístroji Carousel 2000[®] s plynovým chromatografem 1000. Vzorky Hot-melt a Ultrazvuk byly testovány kontaminací pomocí frity smočené v DMMP. Frity jsou tenké skleněné trubičky spečené do kruhové desky s různou velikostí pórů. Smočená fritra potom byla položena na distanční kroužek nad samotný vzorek. Schéma testování je znázorněno na obrázku 44.



Obrázek 44: Schéma testování aparaturou Carousel 2000[®]: A-smočená fritra, B-distanční kroužek, C-testovaný vzorek



Obrázek 45: Průběh testování vzorků při permeaci DMMP

Tabulka 22: Naměřená rezistenční doba vzorků při permeaci DMMP

	blank	Ultrazvuk	Hot-melt
RD min	-	281	198

Graf na obrázku 45 popisuje průběh zkoušky odolnosti vůči pronikání DMMP. Červená úsečka znázorňuje permeační rychlost $F = 1 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$, což je dle norem ČSN EN 16523-1 a 16523-2 naše hodnotící kritérium. Na grafu je znázorněna i rezistence DMMP blank, která by měla určovat rezistenční dobu slepého vzorku. V tomto případě určuje čas, který je dán průnikem testované látky bez vzorku. Z tabulky i z grafu je potom zřejmé, že lepší hodnoty vykazuje vzorek Ultrazvuk, který převyšuje rezistenční dobu vzorku Hot-melt o 83 minut.

3.6.5.3 Odolnosti vzorků proti pronikání Somanu (GD)

Vzorky testovaného materiálu byly kontaminovány GD přes silikonovou membránu o tloušťce 0,5 mm. Samotná silikonová membrána má rezistenční dobu 5 minut, v tabulce 23 uvedeno jako blank. Měření probíhalo za statických podmínek při 30°C. Měření proběhlo obdobně jako v případě metodiky Jodotest – ve skleněných nádobkách s indikačním roztokem. Metodika je blíže popsána v kapitole 2.4.4 Test odolnosti materiálu vůči kapkám Somanu.

Tabulka 23: Naměřená rezistenční doba vzorků při permeaci GD

	blank	Ultrazvuk	Hotmelt
RD min	5	25,5 h	15,5 h

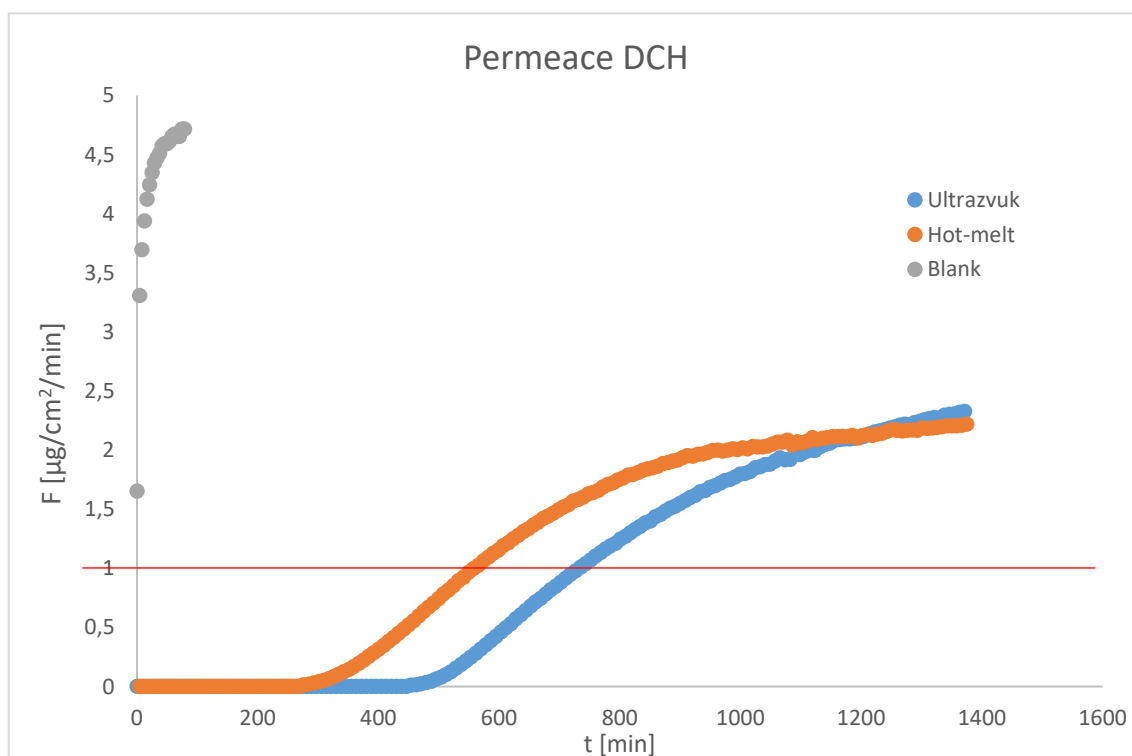
Vzorky byly měřeny podobně jako při měření metodikou Jodotest. Vzorky bylo nutné v určitých intervalech kontrolovat, porovnávat se slepým vzorkem a standardním roztokem a pozorovat změnu zbarvení indikačního roztoku. Za průnik Somanu se považuje dosažení shodného zbarvení se standardním roztokem. I při takto subjektivním hodnocení tak lze dosáhnout přesně naměřených hodnot. Oba měřené vzorky vykazovaly velmi dobrou rezistenci vůči pronikání GD. Vzorek Ultrazvuk dokonce svou rezistencí převyšuje vzorek Hotmelt o celých 10 hodin.

3.6.5.4 Odolnosti vzorků proti pronikání 1,6-dichlorhexanu (DCH)

Testování vzorků Hot-melt a Ultrazvuk proběhlo za stejných podmínek jako při testování při permeaci DMMP. Měření bylo provedeno za statických podmínek při 25 °C, na přístroji Carousel 2000[®] s plynovým chromatografem 1000. Vzorky Hot-melt a Ultrazvuk byly testovány kontaminací pomocí frity smočené v DCH. Smočená fritka byla položena na distanční kroužek nad vzorek. Schéma testování je znázorněno na obrázku 44.

Tabulka 24: Naměřená rezistenční doba vzorků při permeaci DCH

	blank	Ultrazvuk	Hot-melt
RD min	-	727	558



Obrázek 46: Průběh testování vzorků při permeaci DCH

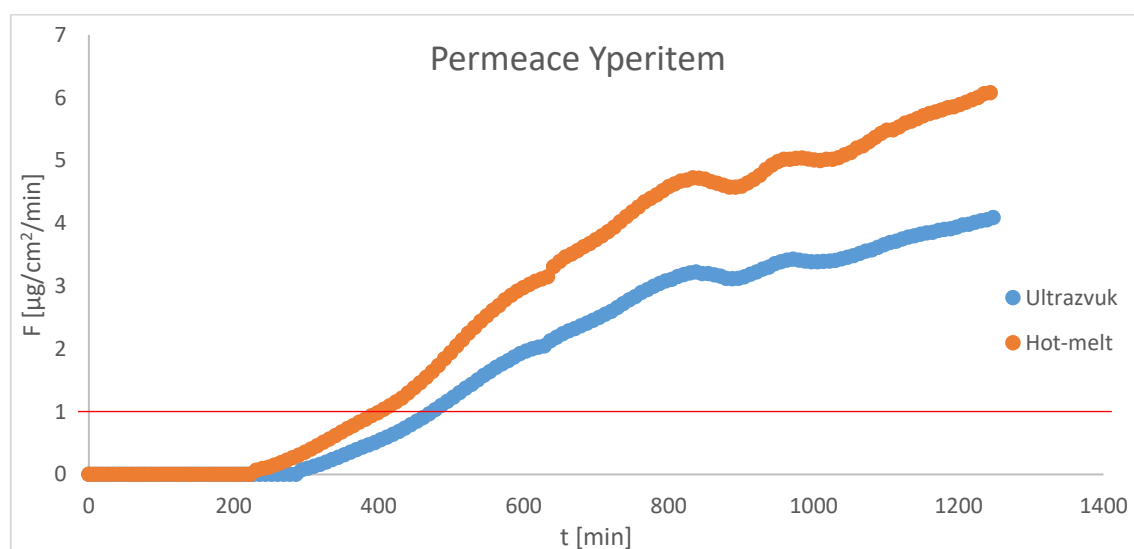
V tabulce 24 jsou zaznamenány hodnoty při hodnotícím kritériu permeační rychlosti $F = 1 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$, tato hodnota je v grafu 46 znázorněna červenou úsečkou. Graf na obrázku 46 popisuje průběh zkoušky odolnosti vůči pronikání DCH. Z tabulky i z grafu je opět zřejmé, že lepší hodnoty vykazuje vzorek Ultrazvuk, který převyšuje rezistenční dobu vzorku Hot-melt o 169 minut.

3.6.5.5 Odolnosti vzorků proti pronikání Yperitu

Testování vzorků Hot-melt a Ultrazvuk proběhlo za stejných podmínek jako při testování při permeaci DMMP a DCH. Měření bylo provedeno za statických podmínek při 25 °C, na přístroji Carousel 2000[®] s plynovým chromatografem 1000. Vzorky Hot-melt a Ultrazvuk byly testovány kontaminací přes 0,5 mm silnou silikonovou membránu, na kterou byla položena smočená fritra v Yperitu. Samotná silikonová membrána má rezistenční dobu 4 minuty, jak je uvedeno v tabulce 25 pod pojmem blank.

Tabulka 25: Naměřená rezistenční doba vzorků při permeaci Yperitem

	blank	Ultrazvuk	Hot-melt
RD min	4	470	398



Obrázek 47: Průběh testování vzorků při permeaci Yperitem

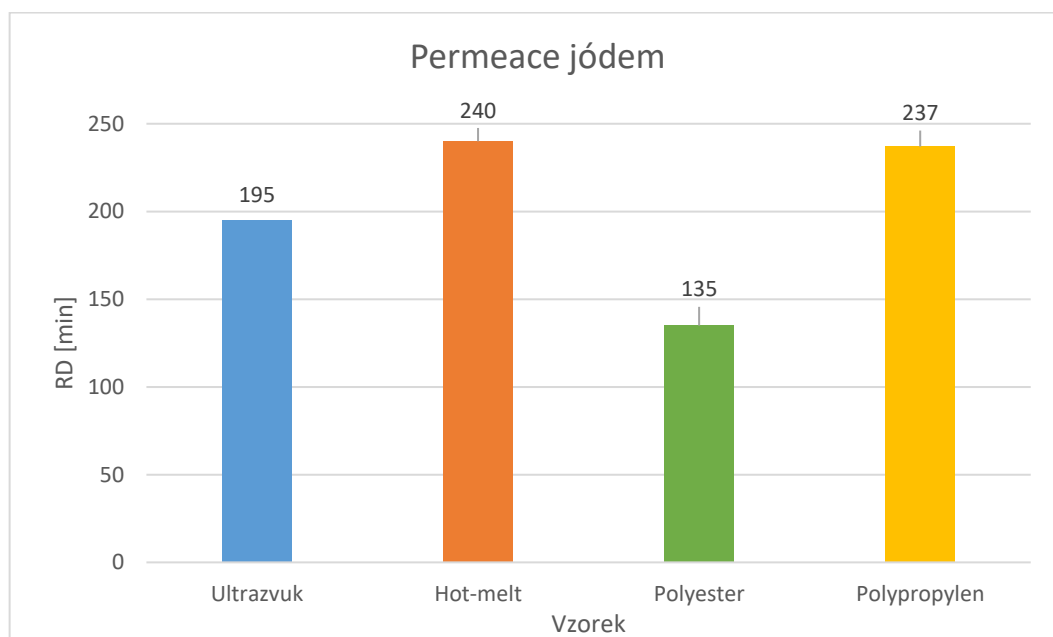
V tabulce 25 jsou zapsány hodnoty při hodnotícím kritériu permeační rychlosti $F = 1 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$, tato hodnota je na obrázku 47 znázorněna červenou úsečkou. Graf na obrázku 47 popisuje průběh zkoušky odolnosti vzorků vůči pronikání Yperitu. Z tabulky i z grafu je opět zřejmé, že lepší hodnoty vykazuje vzorek Ultrazvuk, který převyšuje rezistenční dobu vzorku Hot-melt o 72 minut.

3.6.5.6 Odolnosti vzorků Polyester a Polypropylen proti pronikání jódu

V poslední fázi diplomové práce byly vyrobeny vzorky Polyester a Polypropylen, popsané blíže v kapitole 3.6.3 Závislost prodyšnosti na množství aktivního uhlí. Pomocí Jodotestu byly vzorky s 3 gramy inkorporovaného aktivního uhlí proměřeny na pronikání jódu skrze materiál. Naměřené hodnoty jsou znázorněny v tabulce 26.

Tabulka 26: Naměřené rezistenční doby pro vzorky Polypropylen a Polyester

Vzorek	Tloušťka [mm]	RD [min]	Hmotnost-před měřením [g]	Hmotnost – po měření [g]	Přívazek [g]
Polypropylen	3,807 ± 0,170	237	0,844	0,896	0,052
Polyester	2,255 ± 0,070	135	0,636	0,675	0,039

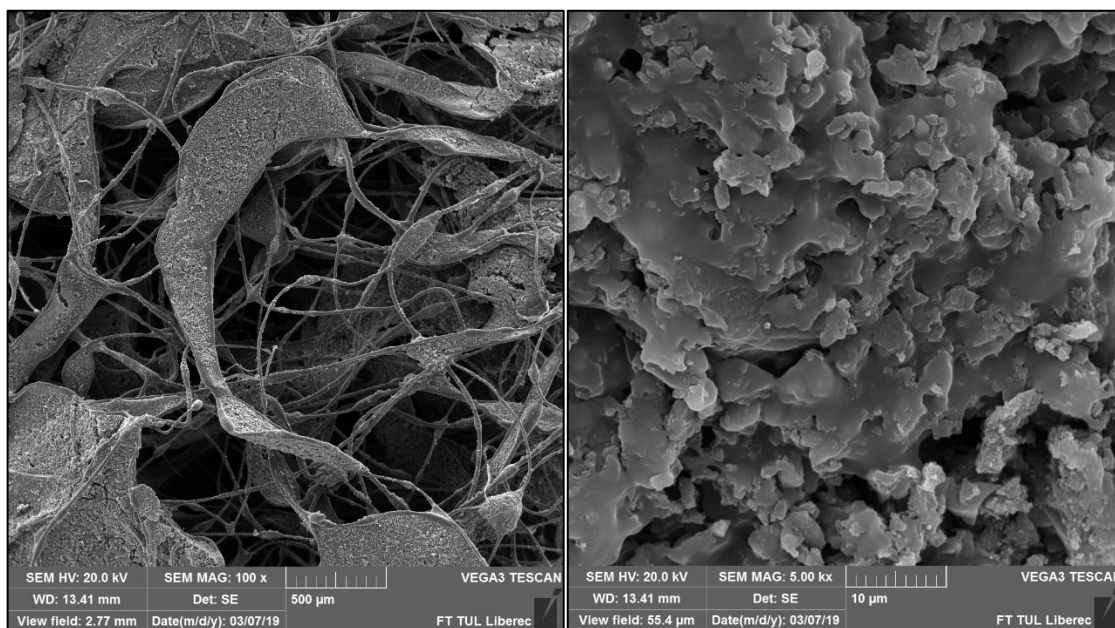


Obrázek 48: Porovnání vzorků při permeaci jódem

Data z tabulky 26 říkají, že lepších hodnot dosahuje vzorek Polypropylen, který má o 70 g/m² vyšší plošnou hmotnost než vzorek Polyester. Při porovnání nejlepších vzorků z obou měření průniku jódu (Obrázek 48), tedy vzorek Polypropylen a vzorek Ultrazvuk lze zjistit, že vzorek Polypropylen dosahuje o 42 minut vyšší rezistenční dobu při průniku jódu. Při měření paropropustnosti vzorky vykazují velice podobné hodnoty, vzorek Polypropylen má však nižší plošnou hmotnost asi o 90 g/m², což by mohlo být rozhodujícím faktorem.

3.7 Analýza armádního obleku typu FOP-96

V rešeršní části této diplomové práce, která vychází z bakalářské práce, je mylně popsán armádní oblek typu FOP-96 jako pětivrstvý materiál [3]. Jak je již zmíněno v kapitole 3.6.3 Prodyšnost, armádní bunda je složena ze tří vrstev: tkanina s voděodolným a oleofobním zátěrem, netkaný materiál s dispergovanými částicemi aktivního uhlí a podšívkový materiál. Bližší specifikace potom říká, že je podšívkový materiál vyroben z polyamidu (nylonu), vrchní materiál se skládá – 49 % bavlna a 51 % polyester a funkční vrstva – 50 % aktivní uhlí, 35 % akrylát a 15 % polyester. V bakalářské práci je také mylně popsán funkční materiál. Gopalakrishnan v článku sice píše o zvýšení prodyšnosti pomocí vpichování, průnik jehly na obrázku 2 však není pro zvýšení prodyšnosti materiálu. Vzorek byl odebrán ze švu textilie, průchod tak vznikl po šití při spojování dvou kusů materiálu. Armádní bunda tedy může vycházet z popsaného materiálu Gopalakrishnanem, je ovšem v pozměněné formě.

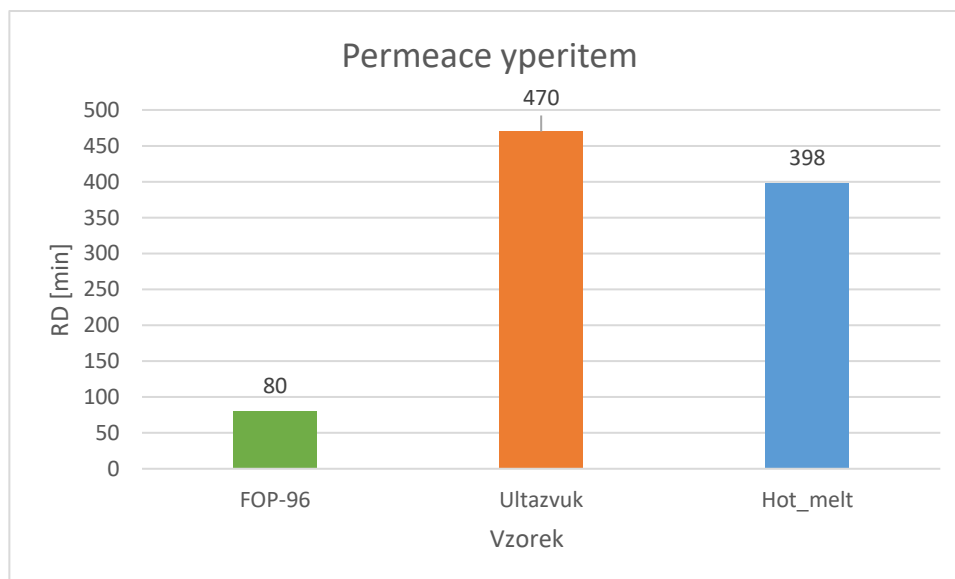


Obrázek 49: Inkorporované aktivní uhlí do funkční vrstvy armádní bundy pomocí impregnace. Celkový náhled na inkorporované aktivní uhlí do pórů netkané textilie – zvětšení 100x, měřítko 500 μm (vlevo). Přibližné dispergované částice aktivního uhlí – zvětšení 5000x, měřítko 10 μm (vpravo).

Na obrázku 49 je vidět netkaná vrstva s impregnovaným aktivním uhlím. Z celkového náhledu je zřejmé, že vlákenná funkční vrstva disponuje vysokou pórovitostí, a proto dosahovala tak velkých hodnot při měření prodyšnosti. Z přiblížení na částice aktivního uhlí je potom zřejmé, že při dispergaci došlo k částečnému zaslepení pórů, které snižují funkčnost materiálu. Částice aktivního uhlí jsou v netkané textilií dobře zachyceny a nedochází k jejich úbytku.

Zkušební metoda (vstup-výstup)	Parametr (jednotka)	Požadovaná hodnota	Podmínky zkoušky
Test na páry (v-v)	Doba průniku (min)	≥ 80	yperit; nasycené páry
Ležící kapka (l-v)	Doba průniku (min)	≥ 240	yperit; kapky 0,1 µl; 1 g/m ²
Promokavost (l-l)	Doba průniku (min)	≥ 480	yperit; kapky 1 µl; 1 g/m ²
Test na páry (v-v)	Dávka (mg.min/m ³)	≤ 500	yperit; páry 11 mg/m ³ ; 5 m/s; 6 h
Ležící kapka (l-v)	Proniklé množství (µg/cm ²)	≤ 4	yperit; kapky 1 µl; 10 g/m ² ; 24 h
Padající kapka (l-v)	Proniklé množství (µg/cm ²)	≤ 4	yperit; kapka 1 µl; 2 m; 24 h

Obrázek 50: Specifikace odolnosti armádní bundy typu FOP-96 [50]



Obrázek 51: Porovnání armádní bundy typu FOP-96 s vyrobenými vzorky při permeaci yperitem - test na páry

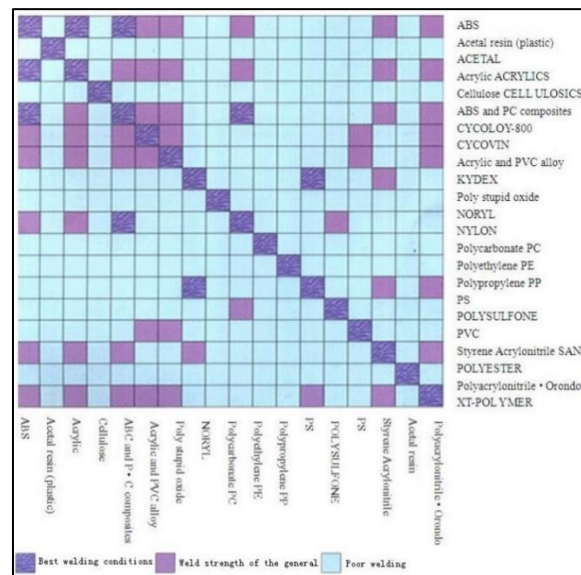
Tabulka na obrázku 50 blíže specifikuje rezistenční vlastnosti armádní bundy typu FOP-96. S jistotou lze říci, že to je specifikace všech tří vrstev, protože při měření samotné vrstvy s aktivním uhlím by nebylo možné měřit ležící kapku nebo promokavost materiálu. Jak již bylo zmíněno, vrchní tkanina je opatřena hydrofobní a oleofobní vrstvou, která rezistenci zvyšuje. Při porovnání vzorků s armádní bundou je toto nutné vzít v úvahu. Také je nutné mít na mysli, že vzorky nejsou opatřeny dekontaminační vrstvou, vrchním ripstop materiálem a podšívkou, které by rezistenci vzorků přinejmenším o pár minut zvýšily. Před porovnáním s vrstvami testovanými na permeaci yperitem je nutno zopakovat, že test probíhal pomocí frity smočené v yperitu položené na silikonovou membránu, přes kterou látka prochází, a na rubní stranu tedy prochází jen páry (kapalná fáze yperitu neprotéká skrze materiál). Při porovnání výsledků testu na páry je patrné, že nejvyšší rezistenci proti Yperitu má vzorek Ultrazvuk, více v kapitole 3.6.5.5, druhou nejvyšší má vzorek Hot-melt a až daleko za nimi je armádní bunda FOP-96. Vzorek Ultrazvuk tak převyšuje materiál typu FOP-96 o celých 390 minut. Grafické porovnání výsledků je potom znázorněno na obrázku 51.

4 Diskuze

Vzorky byly vyráběny několika postupy. Nejdříve bylo k problému přistupováno jako ke kontinuální výrobě, kdy byl záměr sestavit technologie za sebou tak, aby bylo možné vyrábět hotový kompozitní materiál. Proto se začátek výroby zabývá seznámením se s přístroji odstředivého a střídavého zvlákňování. V první sérii výroby byl použit koncept kontinuální výroby pomocí technologií meltblown a střídavého zvlákňování s cílem začlenit i odstředivé zvlákňování. Přístroj pro odstředivé zvlákňování vykazoval nízkou výtěžnost při velké spotřebě materiálu, a tak bylo odstředivé zvlákňování vyloučeno z výroby. Z počátku bylo řešeno sestavení aparatur, aby docházelo ke strhávání a ukládání nanovláken proudem vzduchu z technologie meltblown na kolektor. Při snížení parazitních proudů vzduchu došlo k zapojení naprašovacího zařízení, které mělo stejnoměrně nanášet aktivní uhlí (AU) po celé ploše právě vyrobených vlákenných vrstev. Při sestavení všech jednotlivých aparatur a jejich uvedení do chodu však docházelo k rozprašování AU po celém okolí laboratoře. Proud vzduchu, používaný při meltblown technologii, odnášel částice aktivního uhlí do prostoru, při použití tohoto způsobu nebylo možné kontrolovat množství naprašovaného AU ve vlákenném materiálu. I při snížení vzdálenosti naprašovacího zařízení od vlákenné vrstvy nedošlo ke zlepšení. I přesto bylo vyrobeno několik vzorků, které byly odeslány do SÚJCHBO na otestování průniku nebezpečných látek. Vzorky neměly jen nízkou rezistenci vůči průniku nebezpečných látek, byly také málo objemné.

V druhé části bylo k výrobě přistupováno z druhého konce. To znamená, že byly shromážděny netkané textilie různých technologií výroby, které představovaly hotové vrstvy. Ve snaze vytvořit vhodnou nosnou textilií pro sorbenty byly na sebe tyto vrstvy vrstveny. Pro vrstvený materiál bylo nutné najít kompromis mezi jeho objemností, možnou aplikací sorbentu a zachování jeho funkčnosti po aplikaci sorbentu. Vrstvením byla vyrobena série různých vzorků, které bylo nutné nejen poskládat, ale také zpevnit. Vzorky byly zpevněny pomocí laminace. Po zpevnění všech vzorků byl vybrán ten, který měl po laminaci nejlepší textilní vlastnosti. Do vybraného vzorku mělo být v další fázi inkorporováno AU. Mezitím však byly panem docentem Pokorným vyrobeny a dodány vrstvy nanovláken, které byly použity do vybraného vzorku. Po seskládání dostupných materiálů bylo přikročeno k inkorporaci částic AU do nosného materiálu. Nejprve bylo použito kartáčové naprašovací zařízení, pomocí kterého však docházelo pouze k nestejnomyému

a velice neobratnému naprašování. Bylo zkoušeno i naprašování pomocí manuálního nasypání aktivního uhlí na netkanou vrstvu s jeho následným rozprostřením za pomoci štětce po celém povrchu. Nejlepší způsob byl však nalezen v manuálním rozsypání AU z bezprostřední výšky a jeho následným rozprostření pomocí plastové karty s napodobením technologie raklování. Stejnóměrnost rozprostření AU tedy potom záleželo jen na manuální zručnosti. Po inkorporaci sorbentu do nosné textilie bylo přistoupeno ke zpevnění vrstev. Při zpevnění pomocí laminace však došlo k roztavení nanovláken za vzniku "folie". Také nedošlo k propojení všech vrstev, a tak se vytvořila kapsa. Vytvoření kapsy si lze vysvětlit pomocí obrázku 52, který popisuje svařitelnost nebo také pojitelnost plastů. Analýzou řádku pro Polyester zjistíme, že s ním Polypropylen nebo Polyethylen pojít nelze. Stejně tak si to lze vysvětlit i u následného pojení pomocí ultrazvuku, kdy nedocházelo k pojení spunbond textilie (PE, PP) s netkanou textilií (PES). Do této doby bylo další možností spojení vrstev sešitím. Touto metodou však docházelo k vytvoření děr po vpichu jehly, které by mohly mít za důsledek snížení rezistenční doby vůči chemickým bojovým látkám. Šité spoje tedy musely být ještě pojeny pomocí ultrazvuku, kdy docházelo k roztavení přize a zacelení průchodů, což se potvrdilo i ze snímků z elektronového mikroskopu.



Obrázek 52: Svařitelnost plastů [51]

Vyrobené vzorky byly testovány na prodyšnost, paropropustnost, úbytek částic a průchod bojových látek. Při měření prodyšnosti bylo prokázáno, že při laminaci vzorků docházelo k roztavení nanovláken a vytvořila se téměř nepropustná folie. Prodyšnost Hot-

melt vzorků byla zvýšena aplikovaným polymerním lepidlem, díky kterému se mezi vrstvami vytvořili distanční mezery a zvýšil se tak průchod vzduchu. Při měření prodyšnosti byla měřena i závislost prodyšnosti na množství aktivního uhlí. Při měření bylo zjištěno, že závislost je téměř lineární. Samozřejmě záleží na stejnoměrnosti rozptýlení částic AU v netkaném materiálu. Velice zajímavý je také fakt, že největší ovlivnění nastalo při inkorporaci pouhého půl gramu částic. Měření závislosti také poukázalo na ovlivnění prodyšnosti použitým materiálem. Materiál s nižší plošnou hmotností v dané sestavě vykazoval nižší prodyšnost než u vzorku s vyšší plošnou hmotností, což si lze vysvětlit větší tloušťkou materiálu, rozdílů jsou však velmi malé. Nízká prodyšnost je velice důležitá, neboť vysoká prodyšnost napomáhá průniku chemických bojových látek.

Z měření paropropustnosti lze teoreticky odvodit závislost na tloušťce materiálu a pórovitosti. Vzorek Hot-melt, který disponuje distančními mezerami a velkou tloušťkou materiálu, má vyšší hodnoty paropropustnosti než vzorek Ultrazvuk. Právě tyto faktory teoreticky ovlivňují transport molekul potu skrze materiál. Teoretický předpoklad potvrzuje i armádní bunda, která není tolik objemná jako vzorek Hot-melt, ale má velmi vysokou pórovitost a prodyšnost. Závislost paropropustnosti na tloušťce materiálu potvrzují i výsledky z měření závislosti paropropustnosti na množství AU, kdy byla použita více a méně objemná netkaná textilie.

Při dynamickém i statickém testování úbytku částic byl prokázán nízký úbytek AU. Při statickém testování byly podmínky nastaveny na až extrémní podmínky. Ovšem i při takových podmínkách došlo k malému úbytku AU. Při dynamickém testování byly vzorky podrobeny vibračním pohybům, oproti statickému testování byl testu vystaven celý vzorek. Vzorky nebyly žádným způsobem zakončeny, a tak je možné, že k největšímu úbytku částic došlo přes kraje vzorku. I při dynamickém testování došlo k velmi malému úbytku částic AU.

Měřením odolnosti proti průniku náhradám bojových látek, ale i samotných bojových látek, byla měřena rezistenční doba, po kterou byly vzorky schopny odolávat testované látce než prošla skrze materiál. Všechna měření proběhla ve Státní ústavu pro jadernou, chemickou a biologickou obranu. Výsledky z měření pak jednoznačně poukazují na vzorek Ultrazvuk, který má nejen výbornou rezistenci vůči bojovým látkám i jejich náhradám, ale dokonce disponuje větruodolností, dobrou paropropustností, a prokázal se při dynamickém a statickém testování úbytku částic.

V poslední fázi diplomové práce byly vyrobeny materiály se sníženou plošnou hmotností, které byly vyrobeny za účelem co nejvíce snížit možné faktory ovlivňující měření závislostí. Byly jimi vzorek Polyester a Polypropylen použité pro měření závislosti prodyšnosti a paropropustnosti na množství aktivního uhlí. Tyto materiály byly také odeslány do SÚJCHBO, kde byly zatím proměřeny pouze na odolnost proti jódu. Vzorek Polypropylen dosáhl stanovené hranice rezistence při Jodotestu, ale ani vzorek Polyester by nemusel být zcela zavrhnut. Z předchozích výsledků je totiž jisté, že Jodotest určuje nejnižší rezistenční dobu a při měření permeací bojovými látkami vzorky dosahují vyšších časů. Finální produkt by měl také obsahovat další vrstvy - dekontaminační vrstvu, vrchní ripstop materiál a podšívku, které by rezistenční dobu ještě zvýšily.

Poslední kapitola se zabývá samotnou armádní bundou typu FOP-96, která je vlastnostmi porovnávána s naměřenými výsledky. Samozřejmě je důležité brát v úvahu rozdílnost měření a složení vrstev, kdy jsou u armádní bundy měřeny vlastnosti na celém kompozitním materiálu, oproti tomu u vyrobených vzorků pouze vlastnosti na vyvíjené funkční vrstvě. Také jsou známy pouze měřící postupy při vyrobených vzorcích, nikoliv však u armádní bundy. I tak lze ale říci, že vyrobené vzorky disponují vyšší rezistenční dobou vůči pronikání yperitu, nižší prodyšností, která je důležitá při snížení průniku bojových látek, a i když se přidáním ripstop tkaniny zvýší paropropustnost o $1 \text{ Pa}\cdot\text{m}^2/\text{W}$, stále dosahuje lepších hodnot. Přidanou hodnotou může být také textilní charakteristika vzorku, který je příjemnější na omak. Pro ještě lepší hodnoty paropropustnosti by bylo dobré vylepšit a použít vzorek Polyester.

5 Závěr

V teoretické části byly popsány technologie používané pro výrobu a pojení netkaných textilií a technologií sloužících pro měření funkčních vlastností vyrobených materiálů. Jedna z kapitol se také věnuje aktivnímu uhlí, které slouží jako sorpční materiál charakteristický svým velkým měrným povrchem, na který je schopné absorbovat škodlivé látky z plyných i kapalných látek.

Praktická část se zabývala výrobou kompozitních materiálů vhodných pro inkorporaci částic sorbentů, které jsou schopné zachytit nebezpečné látky a případně je přeměnit na látky bezpečné. Velice důležité je samotné vnášení částic aktivního uhlí do materiálu, neboť při neopatrné inkorporaci dochází k prášení částic aktivního uhlí do okolí a snížení jeho množství v materiálu. V rámci praktické části proto bylo navrženo vnášení částic aktivního uhlí do netkaného materiálu a jeho rovnoměrného rozprostření po celé ploše. Dalším důležitým krokem bylo zjistit, jaká je nejvhodnější technologie pro pojení a zpevnění vrstev. Správným pojením lze snížit a případně zamezit migraci části aktivního uhlí.

Testováním vlastností vzorků na prodyšnost byla prokázána větru odolnost materiálu a měřením paropropustnosti byla prokázána dobrá propustnost pro pot. Pomocí dynamického a statického měření úbytku částic bylo prokázáno, že nedošlo k jejich úbytku a použitá nanovlákna byla schopna udržet částice aktivního uhlí v materiálu. Otestováním a porovnáním vzorků s armádním oděvem typu FOP-96 bylo prokázáno, že vzorek Ultrazvuk má ve všech směrech lepší vlastnosti než zmíněný oděv určený pro boj s chemickými bojovými látkami užívaný armádou České republiky.

Pro další vývoj by bylo dobré vytvořit závislost paropropustnosti na prodyšnosti materiálů, případně vytvořit závislost paropropustnosti a prodyšnosti na velikostech pórů. Dalším krokem by mohl být vývoj dekontaminační vrstvy s oxidy kovů, která by sloužila k rozkladu nebezpečných látek na bezpečné a ke zvýšení rezistenční doby celého obleku. Pro přesnější výsledky odolnosti materiálů by bylo vhodné testovat hotový materiál, který by se skládal z krycího ripstop materiálu s oleofobním a hydrofobním zátěrem, funkční vrstvy s aktivním uhlím, dekontaminační vrstvy s částicemi oxidů kovů a podšívky.

Literatura

- [1] *Home / Flexzorb* [online]. Copyright © [cit. 01.02.2019]. Dostupné z: http://flexzorb.com/wp-content/uploads/2017/09/13680-Flexorb-Defence-Lea-flet_061216.pdf
- [2] History and Timeline of Activated Carbon Giant. *Activated Carbon Leader in Air and Water Purification* [online]. Copyright © 2019 Calgon Carbon Corporation [cit. 01.02.2019]. Dostupné z: <https://www.calgoncarbon.com/about/history/>
- [3] ULMAN, Ivan. *Vývoj nanovlákných kompozitních materiálů s inkorporovaným aktivním uhlím pro filtrační účely*. Liberec, 2015. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Jiří Chvojka, Ph.D.
- [4] RUSSELL, S. *Handbook of Nonwovens*. Woodhead Publishing, 2007. ISBN 978-1-85573-603-0.
- [5] NPTEL :: Textile Engineering - Nonwoven Technology. *NPTEL* [online]. Copyright © Dynamic Drive DHTML code library [cit. 01.02.2019]. Dostupné z: <https://nptel.ac.in/courses/116102014/9>
- [6] LIM, H. "A review of spun bond process", *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*, vol. 6, no.3, pp.1-13, 2010.
- [7] Kikutani, I, Radhakrishnan, J., Arikawa, S., Takaku, A., Okui, N., Jin, N., Niwa, F., Kudo, Y.: "High-Speed Melt Spinning of Bicomponent Fibers: Mechanism of Fiber Structure Development in Poly (ethylene terephthalate)/Propylene System", *J.Appl.Pol.Sci.* Vol.62, 1996, 1913-1924.
- [8] Bikomponentní netkaná textilie Pegatex S BICO - PFNonwovens Czech s.r.o.. *PFNonwovens Czech s.r.o.* [online]. Copyright © 2005 [cit. 01.02.2019]. Dostupné z: <http://www.pfnonwovens.cz/bikomponentni-netkana-textilie-pegatex-s-bico>
- [9] CHANG, Huibin, Jeffrey LUO, Prabhakar V. GULGUNJE a Satish KUMAR. Structural and Functional Fibers. *Annual Review of Materials Research*[online]. 2017, **47**(1), 331-359 [cit. 2019-02-01]. DOI: 10.1146/annurev-matsci-120116-114326. ISSN 1531-7331. Dostupné z: <http://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-matsci-120116-114326>

- [10] Meltblown - Innovatec. *Einer der modernsten Hersteller in der Meltblown-Produktion*. - Innovatec [online]. Copyright © 2015 [cit. 04.02.2019]. Dostupné z: <https://melt-blown.com/en/ueber-uns/meltblown/>
- [11] BRESEE, Randall R. a Wen-Chien KO. Fiber Formation during Melt Blowing. *International Nonwovens Journal*. 2018, **os-12(2)**, 2257-2261. DOI: 10.1177/1558925003os-1200209. ISSN 1527-2494. Dostupné také z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1558925003os-1200209>
- [12] JIRSÁK, Oldřich a Klára KALINOVÁ. *Netkané textilie*. Liberec: Technická univerzita, 2003. ISBN 80-708-3746-2.
- [13] PADRON, Simon, Arturo FUENTES, Dumitru CARUNTU a Karen LOZANO. Experimental study of nanofiber production through forcespinning. *Journal of Applied Physics*. 2013, **113(2)**. DOI: 10.1063/1.4769886. ISSN 0021-8979. Dostupné také z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4769886>
- [14] BADROSSAMAY, Mohammad Reza, Holly Alice MCILWEE, Josue A. GOSS a Kevin Kit PARKER. Nanofiber Assembly by Rotary Jet-Spinning. *Nano Letters*. 2010, **10(6)**, 2257-2261. DOI: 10.1021/nl101355x. ISSN 1530-6984. Dostupné také z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/nl101355x>
- [15] PUHALOVÁ, Ivana. *Odstředivé zvláknování z tavenin*. Liberec, 2016. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Lenka Blažková
- [16] HOŠEK, Jan. *Úvod do nanotechnologie*. V Praze: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 978-80-01-04555-8.
- [17] RAMAKRISHNA, Seeram. *An introduction to electrospinning and nanofibers*. Hackensack, NJ: World Scientific, c2005. ISBN 978-981-256-415-3.
- [18] JIRSÁK, Oldřich: Nasivynalezci. *Nasivynalezci* [online]. Dostupné z: <https://nasivynalezci.webnode.cz/oldrich-jirsak2/>
- [19] ADOMAVIČIŪTĖ, Erika, Sigitas STANYS, Modestas ŽILIUS, Vaida JUŠKAITĖ, Alvydas PAVILONIS a Vitalis BRIEDIS. Formation and Biopharmaceutical Characterization of Electrospun PVP Mats with Propolis and Silver Nanoparticles for Fast Releasing Wound Dressing. *BioMed Research International*. 2016, **2016**, 1-11. DOI: 10.1155/2016/4648287. ISSN 2314-6133. Dostupné také z: <http://www.hindawi.com/journals/bmri/2016/4648287/>

- [20] KESSICK, Royal, John FENN a Gary TEPPER. The use of AC potentials in electrospaying and electrospinning processes. *Polymer*. 2004, **45**(9), 2981-2984. DOI: 10.1016/j.polymer.2004.02.056. ISSN 00323861. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032386104001934>
- [21] MAHESHWARI, Siddharth a Hsueh-Chia CHANG. Assembly of Multi-Stranded Nanofiber Threads through AC Electrospinning. *Advanced Materials*. 2009, **21**(3), 349-354. DOI: 10.1002/adma.200800722. ISSN 09359648. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adma.200800722>
- [22] POKORNY, P., E. KOSTAKOVA, F. SANETRNÍK, et al. Effective AC needleless and collectorless electrospinning for yarn production. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2014, **16**(48), 26816-26822. DOI: 10.1039/C4CP04346D. ISSN 1463-9076. Dostupné také z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=C4CP04346D>
- [23] *Nano[studijní] materiály* [online]. Copyright © [cit. 04.02.2019]. Dostupné z: https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/9314/mod_resource/content/0/2.pdf
- [24] JONES, I. a George STYLIOS. *Joining textiles: principles and applications*. Oxford: Woodhead Publishing Limited in association with the Textile Institute, 2013. Woodhead publishing in textiles, number 110. ISBN 978-184-5696-276.
- [25] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČEK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Vyd. 1. Praha: VŠCHT, 2005, 190 s. ISBN 80-708-0568-4.
- [26] Technologie laminace plamenem | TOMATEX Otrokovice: Tomatex. (Česky) *Textilní interiérové díly pro automotive | TOMATEX Otrokovice a.s.: Tomatex* [online]. Copyright © TOMATEX. 2017 [cit. 04.02.2019]. Dostupné z: <https://tomatex.cz/cs/sluzba/laminace-plamenem/>
- [27] GIERENZ, Gerhard a Werner KARMANN, ed. *Adhesives and Adhesive Tapes* [online]. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag, 2001 [cit. 2019-02-04]. ISBN 9783527612802.
- [28] *GmbH - Herzlich Willkommen* [online]. Copyright © 2013 bm GmbH [cit. 04.02.2019]. Dostupné z: <https://www.bm-gmbh.com/>
- [29] *Ultrasonic Welding – Supersonic Co., Ltd.* [online]. Dostupné z: <http://www.supersonics.com.tw/Ultrasonic-Quilting-Machine-1.jpg>

- [30] YANG, Ralph T. *Adsorbents: fundamentals and applications*. Hoboken,: John Wiley, 2003, xii, 410 s. ISBN 04-712-9741-0
- [31] MARSH, Harry a F. RODRÍGUEZ-REINOSO. *Activated carbon*. Boston: Elsevier, 2006. ISBN 00-804-4463-6.
- [32] Kopecký, J.: *Aktivní uhlí – technologie pro úpravu pitných a bazénových vod*. [cit. 05.02.2019]. Dostupné z: <http://www.jako.cz/VH7-2003-AktivniUhli-valid-030709.pdf>
- [32] Norma ČSN EN ISO 9237. *Textilie – Zjišťování prodyšnosti plošných textilií*. Český normalizační institut, 1996.
- [33] STANĚK, Jaroslav. *Nauka o textilních materiálech*. 1. vyd. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1988, 151 s.
- [34] HU, J.Y., Y.I. LI a K.W. YEUNG. Air permeability. *Clothing Biosensory Engineering* [online]. Elsevier, 2006, 2006, s. 252-260 [cit. 2019-02-05]. DOI: 10.1533/9781845691462.252. ISBN 9781855739253. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781855739253500150>
- [35] Non-destructive determination of comfort parameters during marketing of functional garments and clothing. *ResearchGate / Share and discover research* [online]. Copyright © ResearchGate 2019. All rights reserved. [cit. 15.03.2019]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/242356408_Non-destructive_determination_of_comfort_parameters_during_marketing_of_functional_garments_and_clothing
- [36] Státní ústav jaderné a chemické obrany. *Metodika jodotest*. Kamenná: SÚJCHBO. Dokument word. Interní metodika.
- [37] MAZL 36-10. *Ochrana těla a dýchacích orgánů. Stanovení ochranných vlastností materiálů proti kapkám a parám somanu a yperitu: Permeatest 3*. Kamenná: SÚJCHBO, v.v.i., interní metodika, 2013. 10s.
- [38] SLABOTINSKÝ, J. a CEJPEK, J.: *Automatická aparatura pro vícemístné hodnocení kvality ochranných materiálů proti toxickým látkám Carousel 2000*. Ochrana obyvatelstva – Dekontam 2013, SPBI Ostrava 2013, ISBN 978– 80-7385-122-4.

- [39] DOBRUSKÝ, Jan. *Řešení odvodu vláknitého materiálu při odstředivém zvlákňování*. Liberec, 2018. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Jiří Havlíček, CSc.
- [40] KOVAČIČIN, Jan. *Kombinace výroby vláknitých vrstev technologií meltblown a střídavého elektrostatického zvlákňování*. Liberec, 2015. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Ondřej Novák, Ph.D.
- [41] UNIPOLY - polyesterové střížové šicí nitě. [online]. Dostupné z: <http://www.hagal.cz/cz/sici-nite/unipoly-polyesterove-strizove-sici-nite>
- [42] NANOMEMBRÁNOVÉ MATERIÁLY A FARAMUGO | Faramugo Blog. Český výrobce outdoorového vybavení [online]. Copyright © 2019 Faramugo Blog. All rights reserved. [cit. 17.03.2019]. Dostupné z: <https://www.faramugo.cz/blog/2016/01/nanomembranove-materialy-a-faramugo/>
- [43] Norma ČSN EN 16523-1. Stanovení odolnosti materiálu proti permeaci chemikálií - Část 1: Permeace plynné chemikálie v podmínkách trvalého kontaktu. Český normalizační institut, 2015.
- [44] Norma ČSN EN 16523-2. Stanovení odolnosti materiálu proti permeaci chemikálií - Část 2: Permeace kapalných chemikálií v podmínkách trvalého kontaktu. Český normalizační institut, 2015.
- [45] Norma ASTM F739. Standard Test Method for Permeation of Liquids and Gases through Protective Clothing Materials under Conditions of Continuous Contact. American National Standards Institute, 2012.
- [46] *Chemie prvků*. Edited by N.N Greenwood - A. Earnshaw, Translated by F. Jursík. Praha: Informatorium, 1993. 793 s. ISBN 80-85427-38-9.
- [47] MAIER, Ludwig. ORGANIC PHOSPHORUS COMPOUNDS 90.1 A CONVENIENT, ONE-STEP SYNTHESIS OF ALKYL- AND ARYLPHOSPHONYL DICHLORIDES. *Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements* [online]. 2006, **47**(3-4), 465-470 [cit. 2019-03-27]. DOI: 10.1080/10426509008038002. ISSN 1042-6507. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10426509008038002>

- [48] HOENIG, Steven L. *Handbook of chemical warfare and terrorism*. Westport, Conn.: Greenwood Press, 2002. ISBN 0313324077.
- [49] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Yperit* [online]. c2018 [citováno 27. 03. 2019]. Dostupný z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Yperit&oldid=16775281>
- [50] NBC ochranné oděvy | Bois - filtry. *Bois - filtry* [online]. Dostupné z: <http://www.bois-filtry.cz/nbc-ochranne-odevy.php>
- [51] Odbor technologie svařování ÚST FSI VUT Brno. *ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE* [online]. Copyright © ÚST o. TSPÚ, [cit. 27.03.2019]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/>

Seznam obrázků

<i>Obrázek 1: Snímek Flexzorb pleteniny (a) a tkaniny (b) z elektronového mikroskopu při zvětšení 50x (měřítko 1 mm)</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 2: Snímky vrstvy s aktivním uhlím používané v armádní bundě: a) pojivo s aktivním uhlím se zvětšením 500x, b) průniky po vpichování, zvětšené 50x.....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 3: Schéma mykacího stroje: 1-dopravní pás, 2-podávací válečky, 3-rozvolňovací válec, 4-tambur, 5-obrabeč, 6-pracovní válec, 7-volant, 8-snímávací válec</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 4: Schematické znázornění procesu technologie spunbond</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 5: A) monokomponentní vlákno, B) vlákno jádro/plášť, C) vlákno ostrovy v moři, D) vlákno strana/strana, E) odvozený typ vlákna – proužkované, F) koláčový typ vlákna</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 6: Schématické znázornění procesu technologie meltblown</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 7: Varianty zařízení pro odstředivé zvlákňování: a) tryskové, b) tryskové v kombinaci s elektrostatickými silami, c) tryskové v kombinaci s proudem vzduchu, d) výrobek cukrové vaty, e) beztryskové: 1 - kolektor, 2 - zvlákňovací hlava, 3 - zvlákňovací tryska, 4 - zdroj vysokého napětí, 5 – proud vzduchu, 6 - zvlákňovací štěrbinová, 7 - rotující disk, 8 - dávkování polymerního roztoku či taveniny.....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 8: Schéma "Nanospideru": 1 - generátor stejnosměrného napětí, 2 – nádoba na polymer, 3 - roztok polymeru, 4 - rotační elektroda, 5 - uzemněná elektroda, 6 - nosný materiál (spunbond nebo meltblown), 7 – vrstva nanovláken na podkladové textilii. ...</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 9: Snímky z elektronového rastrovacího mikroskopu: a) nanovlákná vyrobená střídavým (AC) zvlákňováním, b) nanovlákná vyrobená stejnosměrným (DC) zvlákňováním</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 10: Morfologie vláken v závislosti na změně frekvence a napětí; měřítko 10 mm:</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 11: a) schematické a b) reálné zapojení AC zvlákňování: Aparatura je složena z 1 – zdroj vysokého napětí – transformátor, 2 – pumpa pro dávkování polymeru, 3 – zvlákňovací elektroda, 4 – variabilní transformátor pro regulaci napětí, 5 – hydraulický systém.....</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 12: Mikrostruktura spoje termického a chemického pojení.....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 13: Schématické znázornění laminátu.....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 14: Polymerní lepidla pro technologii hot-melt.....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 15: Bodové pojení ultrazvukem</i>	<i>34</i>

<i>Obrázek 16: Snímky aktivního uhlí z elektronového mikroskopu</i>	35
<i>Obrázek 17: Rozdíl mezi "apparent density" a "bed density"</i>	36
<i>Obrázek 18: Možné uspořádání permeačních nádob při měření průniku</i>	41
<i>Obrázek 19: Zařízení pro odstředivé zvlákňování v kombinaci s proudem vzduchu</i>	43
<i>Obrázek 20: Sestavení technologií AC zvlákňování a meltblown [40]</i>	46
<i>Obrázek 21: Sestavení technologií AC zvlákňování a meltblownu: 1 – polystyrenová deska proti parazitnímu proudu vzduchu, 2 – zvlákňovací tryska umístěná pod kolektorem, 3 – naprašovací zařízení, 4 – kolektor s podkladovou textilií, 5 – násypka s částicemi aktivního uhlí</i>	47
<i>Obrázek 22: Vlákněné vrstvy bez částic aktivního uhlí. Veškeré snímky jsou při zvětšení 1000x (měřítko 50μm)</i>	49
<i>Obrázek 23: Vlákněné vrstvy s inkorporovanými částicemi aktivního uhlí. Veškeré snímky jsou při zvětšení 1000x (měřítko 50μm)</i>	49
<i>Obrázek 24: Vlákněná vrstva s inkorporovaným aktivním uhlím pro měření průměrné velikosti částic. Vzorek ze středu textilie Zvětšení 1000x, měřítko 50 μm</i>	51
<i>Obrázek 25: Vlákněná vrstva s inkorporovaným aktivním uhlím pro měření průměrné velikosti částic. Vzorek nejvíce ke kraji. Zvětšení 1000x, měřítko 50 μm</i>	51
<i>Obrázek 26: Laminované vzorky při teplotě $T = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2,3 m/min; 14 sec: vzorky 1-6</i>	53
<i>Obrázek 27: Laminované dílčí materiály pro zhodnocení chování jednotlivých složek: 7A – SB; 7B – MB; 7C – MB (120 $^{\circ}\text{C}$); 7D – VP; 7E – VP1; 7F – VP2; 7G – STRUTO ...</i>	54
<i>Obrázek 28: Laminované vzorky při teplotě $T = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2,3 m/min; 14 sec: vzorek 8; Laminované vzorky při teplotě $T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2,3 m/min; 14 sec: vzorek 9; Laminované vzorky při teplotě $T = 113\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2,3 m/min; 14 sec: vzorky 10-11</i>	54
<i>Obrázek 29: Kartáčové naprašovací zařízení</i>	56
<i>Obrázek 30: Schéma procesu nanášení raklí: 1- přívod pojiva, 2 -rakle, 3 -pojivo, 4 -dopravník, 5 -vlákněná vrstva</i>	56
<i>Obrázek 31: Skládání vlákněných vrstev. A) Vrstvy SB, VP a AC, B) Vrstvy SB, VP, AC, VP + aktivní uhlí, C) Vrstvy SB, VP, AC, VP + aktivní uhlí, AC, VP, D) Finální nezpevněná vrstva složená z SB, VP, AC, VP + aktivní uhlí, AC, VP, SB</i>	57
<i>Obrázek 32: Výsledný kompozitní materiál po laminaci</i>	58
<i>Obrázek 33: Struktura šitého spoje před a po použití pojení pomocí ultrazvuku</i>	60
<i>Obrázek 34: Polyesterová (vlevo) a polypropylenová (vpravo), vpichováním zpevněná, netkaná vrstva při zvětšení 100x (měřítko 500 μm)</i>	61

<i>Obrázek 35: Inkorporované částice aktivního uhlí do netkaného materiálu z polyesteru (vlevo) a polypropylenu (vpravo) metodou raklováním. Zvětšení 100x (měřítko 500 μm).</i>	62
<i>Obrázek 36: Nanovláknenná vrstva před laminací (vlevo) a po laminaci (vpravo) při zvětšení 500x (měřítko 100 μm).</i>	62
<i>Obrázek 37: Částice aktivního uhlí při zvětšení 500x (vlevo – měřítko 100 μm) a při zvětšení 1000x (vpravo – měřítko 50 μm).</i>	63
<i>Obrázek 38: Dynamické testování úbytku částic aktivního uhlí.</i>	65
<i>Obrázek 39: Graf závislosti prodyšnosti na množství aktivního uhlí.</i>	68
<i>Obrázek 40: Graf naměřených hodnot paropropustnosti pro jednotlivé vzorky.</i>	69
<i>Obrázek 41: Graf závislosti paropropustnosti na množství aktivního uhlí.</i>	70
<i>Obrázek 42: Graf naměřených hodnot při permeaci jódem.</i>	72
<i>Obrázek 43: Aparatura Jodotestu po testování vzorku.</i>	73
<i>Obrázek 44: Schéma testování aparaturou Carousel 2000[®]: A-smočená fritra, B-distanční kroužek, C-testovaný vzorek.</i>	74
<i>Obrázek 45: Průběh testování vzorků při permeaci DMMP.</i>	74
<i>Obrázek 46: Průběh testování vzorků při permeaci DCH.</i>	76
<i>Obrázek 47: Průběh testování vzorků při permeaci Yperitem.</i>	77
<i>Obrázek 48: Porovnání vzorků při permeaci jódem.</i>	78
<i>Obrázek 49: Inkorporované aktivní uhlí do funkční vrstvy armádní bundy pomocí impregnace. Celkový náhled na inkorporované aktivní uhlí do pórů netkané textilie – zvětšení 100x, měřítko 500 μm (vlevo). Přibližně dispergované částice aktivního uhlí – zvětšení 5000x, měřítko 10 μm (vpravo).</i>	79
<i>Obrázek 50: Specifikace odolnosti armádní bundy typu FOP-96.</i>	80
<i>Obrázek 51: Porovnání armádní bundy typu FOP-96 s vyrobenými vzorky při permeaci yperitem - test na páry.</i>	80
<i>Obrázek 52: Svařitelnost plastů.</i>	83

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1: Použité polymery pro odstředivé zvlákňování.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 2: Záznam při odstředivém zvlákňování.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 3: Polymery pro střídavé zvlákňování.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 4: Vstupní parametry.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 5: Porovnání průměrů meltblownových vláken při výrobě vrstev s aktivním uhlím a bez něj.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 6: Průměrná velikost částic AU nejbliže ke kraji a ze středu textilie.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 7: Použité materiály.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 8: Vrstvení materiálů pro vytvoření vhodného nosného materiálu pro sorbenty.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 9: Závislost pojení na teplotě.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 10: Použité materiály.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka 11: Specifikace nitě Hagal UNIPOLY 120.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 12: Průměrná velikost polyesterových a polypropylenových vláken.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabulka 13: Průměrná velikost nanovláken.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabulka 14: Úbytek částic aktivního uhlí při statické zkoušce.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabulka 15: Úbytek částic aktivního uhlí při statické zkoušce.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabulka 16: Prodyšnost vzorků se 3 gramy aktivního uhlí a bez něj.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabulka 17: Závislost prodyšnosti na množství aktivního uhlí.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabulka 18: Hodnocení paropropustnosti z hlediska RET i MVTR.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabulka 19: Průměrné hodnoty z měření paropropustnosti.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabulka 20: Závislost paropropustnosti na množství aktivního uhlí.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabulka 21: Výsledky měření odolnosti vzorků proti pronikání jódu.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabulka 22: Naměřená rezistenční doba vzorků při permeaci DMMP.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabulka 23: Naměřená rezistenční doba vzorků při permeaci GD.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabulka 24: Naměřená rezistenční doba vzorků při permeaci DCH.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabulka 25: Naměřená rezistenční doba vzorků při permeaci Yperitem.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabulka 26: Naměřené rezistenční doby pro vzorky Polypropylen a Polyester.....</i>	<i>78</i>