

Nanovláknenné vrstvy s přídatkem oxidů kovů pro dekontaminaci bojových chemických látek

Diplomová práce

Studijní program:

N3106 Textilní inženýrství

Studijní obor:

Netkané a nanovláknenné materiály

Autor práce:

Bc. Eliška Líbalová

Vedoucí práce:

Ing. Jiří Chvojka, Ph.D.

Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů



Zadání diplomové práce

Nanovláknenné vrstvy s přidavkem oxidů kovů pro dekontaminaci bojových chemických látek

Jméno a příjmení: **Bc. Eliška Líbalová**
Osobní číslo: T18000023
Studijní program: N3106 Textilní inženýrství
Studijní obor: Netkané a nanovláknenné materiály
Zadávací katedra: Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů
Akademický rok: **2019/2020**

Zásady pro vypracování:

1. Studium literatury na dané téma
2. Vypracování rešerše a teoretické části
3. Příprava materiálu pro dekontaminaci
4. Vyhodnocení experimentu
5. Diskuse a závěr

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

dle potřeby dokumentace
40-60 dle potřeby
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

1. Brown, P. J., Stevens, K. 2007. Nanofibers and nanotechnology in textiles. Cambridge. Woodhead Publishing Limited. ISBN 978-1-8459-105-9.
2. Das, D., Pourdeyhimi, B. 2014. Composite Nonwoven Materials. Structure, Properties and Applications. Cambridge, Waltham, Kidlington. Woodhead Publishing Series in Textiles. 155. ISBN 978-0-85709-770-5.
3. Kellie, G. 2016. Advances in Technical Nonwovens. Duxford, Cambridge, Kidlington. Woodhead Publishing Series in Textiles. 181. ISBN 978-0-08-100575-0.
4. Khan A.et.all 2019. Metal organic framework composites vol.53, Materials research forum LLC, Millersville, PA 17551, ISSN 2471-8890
5. MacGillivray L.R 2010. Matal organic frameworks, Design and application, John Wiley & Sons, New Jersey, ISBN 978-0-470-19556-7

Vedoucí práce:

Ing. Jiří Chvojka, Ph.D.
Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů

Datum zadání práce:

20. října 2019

Předpokládaný termín odevzdání:

10. ledna 2021

Ing. Jana Drašarová, Ph.D.
děkanka

L.S.

Ing. Jiří Chvojka, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 20. října 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracovala samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědoma toho, 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 nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

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

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědoma následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

4. ledna 2021

Bc. Eliška Líbalová

Poděkování

Nejdříve bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Chvojkovi, Ph.D. za odborné vedení, podnětná doporučení, zapůjčenou literaturu, trpělivost, ochotu a lidský přístup při konzultacích poskytnutých ke zpracování této práce. Taktéž bych chtěla poděkovat doc. Ing. Pavlu Pokornému, Ph.D. za odbornou pomoc doprovázenou cennými a inspirativními radami, podněty a připomínkami. Současně bych chtěla poděkovat Mgr. Jakubu Vaňkovi, PhD. za příjemnou spolupráci na projektu se Státním ústavem jaderné, chemické a biologické obrany v Brně. Velké díky patří také Ing. Ivanu Ulmanovi a Ing. Pavlu Holcovi z katedry netkaných textilií za obrovskou vstřícnost a všestrannou pomoc při realizaci praktické části. V neposlední řadě děkuji Ing. Petru Mikešovi, Ph.D. za důležitý prvotní impulz pro rozhodnutí tématu práce. Největší poděkování však patří mé rodině a také přátelům, kteří mi byli oporou, a jim vděčím za zdárné dokončení mé práce.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá výrobou nanovláknenných vrstev s přidavkem částic oxidů kovů, které mají sloužit k dekontaminaci bojových chemických látek. Nanovláknenné vrstvy byly vyrobeny elektrostatickým zvlákňováním. Aplikace částic oxidu ceričitého, oxidu titaničitého a částic MOFs do nanovláknenného materiálu byla uskutečňována různými metodami, od nanášení na neupravená vlákna po zvlákňování z roztoku polymeru s obsahem částic. Finální produkt s přídatnými vrstvami s aktivním uhlím a svrchní tkaninou a s mezivrstvami ze spunbond netkané textilie by měl sloužit jako ochranný oděv pro vojenské účely, který by měl poskytnout lepší vlastnosti než stávající armádní oděv typu FOP-96. Porovnávanými vlastnostmi jsou prodyšnost, paropropustnost a odolnost proti bojovým chemickým látkám. Vzorky jsou z morfologického hlediska zkoumány pomocí analýzy snímků z elektronového mikroskopu. Výsledkem je série vzorků testovaná Státním ústavem jaderné, chemické a biologické ochrany.

Klíčová slova: oxidy kovů, dekontaminace, protichemické ochranné oděvy, nanovláknna, elektrospinning

Abstract

The diploma thesis deals with the production of nanofiber layers with the addition of metal oxide particles which will be used to decontaminate chemical warfare agents. Nanofiber layers were produced by electrospinning. The application of cerium dioxide, titanium dioxide and MOFs particles to the nanofibrous material was performed by various methods from application to untreated fibres to spinning the polymer solution containing the particles. The final product, with additional layers of activated carbon and an upper fabric, with interlayers of spunbond nonwoven fabric, should serve as protective clothing for military purposes. The aim is to provide better properties than the current military garment type FOP-96. The compared properties were breathability, vapor permeability, resistance to chemical warfare agents. The prepared samples were examined from a morphological point of view by analysis of electron microscope images. The result is a series of samples tested by the State Institute of Nuclear, Chemical and Biological Protection.

Keywords: metal oxides, decontamination, nanofibers, chemical protective clothing, electrospinning

Obsah

Úvod.....	11
1 Teoretická část	12
1.1 Nanovláknenné vrstvy.....	12
1.1.1 Elektrostatické zvlákňování	14
1.1.2 Proces elektrostatického zvlákňování	15
1.1.3 Parametry elektrostatického zvlákňování.....	16
1.2 Spunbond netkané textilie	19
1.2.1 Flashspinning	20
1.3 Částice oxidů kovů	20
1.3.1 Oxid titaničitý (TiO ₂)	21
1.3.2 Oxid ceričitý (CeO ₂).....	21
1.3.3 Metal Organic Frameworks (MOFs).....	22
1.4 Aplikace částic na textilií.....	22
1.4.1 Metody nanášení částic na přírodní vlákna	22
1.4.2 Metody nanášení částic na syntetická vlákna.....	23
1.4.3 Další metody aplikace částic na vlákenný materiál.....	24
1.5 Vrstvy s aktivním uhlím	25
1.5.1 Nosný materiál pro sorbenty	26
1.5.2 Výsledné vlastnosti vzorků	27
1.6 Dekontaminace	27
1.6.1 Metody dekontaminace	28
1.6.2 Bojové látky	29
1.6.3 Simulanty bojových chemických látek	30
1.7 Použití pro protichemické ochranné oděvy	31
1.7.1 Izolační ochranné oděvy	31
1.7.2 Filtrační ochranné oděvy.....	32
1.7.3 Materiálové složení.....	32
1.7.4 Právní a technické předpisy	33
1.8 Rizika nanomateriálů.....	34
1.8.1 Vstup nanočástic do organismu	34
1.8.2 Rizika nanočástic TiO ₂	35
1.9 Testovací techniky.....	36
1.9.1 Prodyšnost.....	36
1.9.2 Paropropustnost.....	37

2	Experimentální část	38
2.1	Příprava textilní vrstvy s přidavkem částic	38
2.1.1	Naleptání a nanesení prášku	39
2.1.2	Disperze a nanesení prášku	40
2.1.3	Disperze s obsahem prášku	41
2.1.4	Samotné nanesení prášku	41
2.1.5	Zvlákňování z roztoku s obsahem prášku	41
2.1.6	Zvlákňování a nanesení prášku	42
2.2	Morfologická charakterizace vyrobených vzorků	43
2.2.1	Velikost částic	49
2.3	Testování vyrobených vzorků	51
2.3.1	Prodyšnost	51
2.3.2	Paropropustnost	52
2.3.3	Odolnost proti pronikání bojových chemických látek	52
3	Výsledky a diskuze	53
	Závěr	56
	Použitá literatura	57
	Seznam obrázků	61
	Seznam tabulek	61

Seznam zkratk

AC elektrospinning – střídavé elektrické zvlákňování

BChL – bojové chemické látky

CeO₂ – oxid ceričitý

CO₂ – oxid uhličitý

DC elektrospinning – stejnosměrné elektrické zvlákňování

FOP-96 – filtrační ochranný převlek, vzor 95

GA – tabun, nervově paralytické látky řady G

GB – sarin, nervově paralytické látky řady G

GD – soman, nervově paralytické látky řady G

HD – yperit, bojová látka řazena mezi zpuchýřující látky

Hm. % – hmotnostní procenta

MOFs – Metal Organic Frameworks

Ot/min – otáčky za minutu

PA – polyamid

PAN – polyakrylonitril

PVA – polyvinylalkohol

PVB – polyvinylbutyral

RET – výparný odpor

ROS – Reactive Oxygen Species – reaktivní formy kyslíku

SD – směrodatná odchylka

SEM – skenovací elektronový mikroskop

SiO₂ – oxid křemičitý

SÚJCHBO – Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany

TiO₂ – oxid titaničitý

VX – nejrozšířenější zástupce nervově paralytických látek řady V

WO₃ – oxid wolframový

ZnO – oxid zinečnatý

Úvod

Cílem diplomové práce bylo připravit nanovlákněné vrstvy s přídavkem částic oxidů kovů vhodné pro dekontaminaci bojových chemických látek.

Vývoj prostředků individuální ochrany vychází z prvního použití zbraní hromadného ničení. K tomu došlo v první světové válce 1. ledna 1915, kdy německá armáda použila chlór. Chlór ovšem příliš neuspěl, místo rozprostření nad daným územím se choval spíše jako hustá mlha a byl závislý na povětrnostních podmínkách. Plyn se ale osvědčil a byl použit znovu, čímž začal vývoj jedů na obou stranách a zároveň i ochranných roušek. Ochranné roušky byly od roku 1916 každému vojáku k dispozici. Roušky byly z gázy nasycené chemikáliemi. Masky se suchými filtry získaly na významu až s použitím aktivního uhlí. Aktivní uhlí pohlcuje páry otravných látek, toho je využíváno dodnes (Moráček, 2017).

Rizika kontaminace chemickými bojovými látkami nebo toxickými látkami jsou poměrně častá během vojenských akcí, teroristických útoků nebo nehod s těmito látkami. Multifunkční materiály jsou proto zásadní pro zajištění ochrany zdraví vojáků a lidí pracujících v nebezpečných podmínkách v oblasti životního prostředí. Tradiční protichemické ochranné oděvy obvykle kombinují prodyšné materiály s izolačními pryžovými materiály nebo s přídavkem aktivního uhlí. Oděvní řešení zajišťují dočasnou fyzickou bariéru, ale často se potýkají s uvolněním propustnosti, nárůstem tepelného stresu, zvyšující se hmotností a celkově jde o objemné vybavení. Dalším nebezpečím je možnost kontaminace časem, způsobená zachycením malého množství nebezpečné sloučeniny v materiálu. Navzdory obecně pozorovanému snížení pronikání kontaminantů, zůstává hlavním problémem škodlivé sloučeniny, např. soman, sarin, neutralizovat (Gugliuzza, 2013).

Přídavné nanovlákněné vrstvy s částicemi oxidů kovů v rozměrech až nanometrových jsou za přítomnosti světla a katalyzátoru schopny fotokatalyticky degradovat škodlivé látky a tím dekontaminovat. Účinná ochrana proti škodlivým látkám je závislá na zajištění rovnoměrného rozložení sorbentu ve stabilní pozici na textilií. Částice lze vázat na vlákna chemicky či fyzikálně, rozhodující je však materiálové složení textilie. Sorbenty jako aktivní uhlí, oxidy kovů jsou specifické svým ohromným měrným povrchem, který poskytuje velké množství reaktivních míst pro rozklad škodlivých látek.

1 Teoretická část

Výroba nanovláknenných vrstev s přídavkem oxidů kovů pro dekontaminaci škodlivých látek má několik podstatných bodů. Technologie a materiál nanovláknenné vrstvy, specifikace částic, způsob nanášení a stabilizace pozice, možnosti použití i rizika. Charakterizační a testovací techniky jsou použity pro ověření a pro klasifikaci docílených vlastností.

1.1 Nanovláknenné vrstvy

Nanovláknna jsou charakteristická svými rozměry, určujícím je průměr. Mezi materiály v nanoměřítku jsou zahrnuta polymerní nanovláknna, která jsou definována jako vláknité materiály o průměru v rozmezí nanometrů až po jeden mikrometr (Nkabinde, 2020; Nirmala, 2014). Nanotechnologie ve vědě, inženýrství i technologiích potom zahrnují zobrazování, měření, modelování, manipulování v nanoměřítku. Fyzikální, chemické i biologické vlastnosti těchto materiálů se různí základními i jedinečnými charakteristikami od jednotlivých atomů a molekul. Výzkum a vývoj v oblasti nanotechnologií je zaměřen na porozumění a vytváření vylepšených materiálů, zařízení a systémů, které tyto nové vlastnosti využívají. Velkou inspirací jsou specifické funkce vyskytující se v přírodě, jejichž principy jsou studovány a následně napodobovány a vyvíjeny. Nanovláknna jsou přírodě známa například v rostlinách vlákna nanocelulózy, nebo v lidském těle jako kolagenová vlákna DNA, nervová vlákna (Almetwally, 2017). Nanomateriály vykazují jedinečné a nové vlastnosti odlišné od jejich odpovídajících objemových materiálů, protože kvantové mechanické vlastnosti elektronů a atomové interakce uvnitř hmoty jsou ovlivněny změnami materiálů v nanoměřítku.

Vlastnosti nanovláknenných materiálů, jak uvádí (Almetwally, 2017), jsou specifické:

- **velkým měrným povrchem,**
- **malým průměrem vláken,**
- **nízkou plošnou hmotností,**
- **filtračními vlastnostmi,**
- **tenkými vrstvami.**

Povrch z nanovláken dokáže snížit kontaktní úhel vody, zlepšit zadržování kapaliny. Samotná textilie je extrémně flexibilní s vysokou axiální pevností. Výjimečné strukturní mechanické vlastnosti jsou důsledkem velké pórovitosti spolu s významným specifickým povrchem (Almetwally, 2017). Jedinečných vlastností lze využít v řadě různých oblastí, jako je bioinženýrství, nanokatalýza, filtrace a elektronika, které uvádí Nkabinde (2020) a zdůvodňuje vysokým poměrem povrchu k objemu elektricky zvlákňovaných nanovláken.

Konkrétnější využití uvádí Brown (2007), zdůvodněné malou velikostí pórů a velkým měrným povrchem:

- **oděvy pro vojáky** – ochrana proti povětrnostním podmínkám, balistice a jaderným, biologickým a chemickým bojovým látkám,
- **filtrační aplikace,**
- **membrány,**
- **výztužná vlákna v kompozitních materiálech,**
- **optické a elektronické aplikace** – piezoelektrické, optické senzory,
- **biomedicínské přístroje** – kosmetika, hojení a čištění kůže, obvazy na rány, dodávka léčiv a léčiva, podpěry pro enzymy nebo katalyzátory, scaffoldy pro tkáňové inženýrství a šablony pro tvorbu dutých vláken s vnitřními průměry v rozsahu nanometrů.

Technologiemi používanými pro výrobu nanovláken jsou typicky: meltblown, flashspinning, elektrospinning, kterým je věnována větší pozornost v textu práce, dalšími metodami jsou drawing, extruze, forcespinning (Almetwally, 2017; Kim, 2019). Metoda drawing je založena na ponoření mikropipety do kapičky polymerního roztoku, mikropipeta je jemně vytažena z kapaliny, v důsledku toho budou nanovláknata natažena a uložena na povrch dotykem koncem mikropipety (Alghoraibi, 2018). Extruze je využívána k výrobě bikomponentních vláken, která vznikají vytlačováním dvou polymerů dohromady ve stejném vlákně ze stejné zvlákňovací trysky. Forcespinning, tedy odstředivé zvlákňování, vyvíjí odstředivou sílu k realizaci vysokorychlostní produkce nanovláken (Almetwally, 2017).

1.1.1 Elektrostatické zvlákňování

Elektrostatické zvlákňování je nejčastěji využívaná metoda k tvorbě nanovláken v současnosti. Počátky elektrospinningu, tzv. elektrostatického zvlákňování, sahají do 30. let 20. století, kdy Formhals uvedl a popsal metody elektrostatického zvlákňování (Brown, 2007; Almetwally, 2017). Technologie až do konce dvacátého století spočívala na využití kapilárních/jehlových zvlákňovacích zařízení. Za účelem zvýšení produktivity byly vyvinuty bezjehlové metody, umožňující z volné hladiny polymerního roztoku spontánní tvorbu polymerních trysek, ze kterých vznikají nanovlákná vlivem působení vnějšího elektrického pole s vysokou hodnotou intenzity. Zařízení pro elektrostatické zvlákňování mají oproti textilním technologiím klasickým (předení, tkaní, pletení) jednoduché konstrukční řešení bez pasivních či pohyblivých součástí. Komplexnost této textilní technologie je zajištěna fyzikálními jevy zahrnující destabilizaci volných hladin polymerních roztoků, vedoucí k tvorbě polymerní trysky, bičování polymerní trysky/vypuzování molekul rozpouštědla z polymerní trysky v důsledku nárůstu chemického potenciálu při zmenšování poloměru trysky. Polymerní trysky vznikající samoorganizací a následující dlužení na nanovlákná je velmi významným novým způsobem výroby vláknenné hmoty (Mikeš, 2015).

Stroje značky Nanospider™, vyráběné firmou Elmarco, jsou průkopníkem této technologie s využitím pro průmysl. Jako koncentrátor elektrostatického pole byl dříve používán pomalu rotující horizontální válec, pokrytý tenkou vrstvou polymerního roztoku, později je používána tenká vodivá struna (Mikeš, 2015; Elmarco).

Při využití stejnosměrného proudu je výsledkem nízká účinnost, je potřeba vždy kolektor a je komplikované kombinovat technologii s dalšími. Oproti tomu elektrospinning s využitím střídavého proudu založený na tyčové zvlákňovací elektrodě vytváří nanovláknennou vlečku s vysokou produktivitou a bez potřeby použití kolektoru (Lukáš, 2006).

Využitelnost je, dle (Mikeš, 2015), pro:

- **tkáňové inženýrství,**
- **nosiče pro podávání léčiv,**
- **obvazové materiály pro hojení kožních poranění,**
- **filtry,**
- **tepelné a zvukové izolace.**

Mechanické vlastnosti jednotlivého elektrostaticky zvlákňovaného vlákna je kvůli malým průměrům za stávajících testovacích technik obtížné, proto jsou testovány vlákenné vrstvy (Brown, 2007).

Meltblownové mikrovlákné i elektrospinningové nanovlákné vrstvy mají srovnatelné pevnostní vlastnosti, ovšem ve srovnání s jinými netkanými textiliemi mají pevnost nižší. Ochranné oděvy vyžadují někdy spíše elektrostaticky zvlákňovanou textili s vyšší pevností, ale nižší pevnost lze využít pro filtrační účely při použití dalších podpůrných textilií. Elektrospinningové nanovlákné vrstvy se vyznačují dobrou pevností na jednotku plochy, měkkým omakem, vysokou povrchovou energií naznačující možnost rychlého přenosu par vlhkosti (Almetwally, 2017).

Elektrospinning může v roztoku pro zvlákňování obsahovat nanočástice propůjčující výslednému materiálu zvláštní funkční vlastnosti. Takto lze zkonstruovat textilie vyhovující multifunkčním požadavkům. Je možné také pracovat s povrchovými úpravami a povrstvováním. Byla prokázána i možnost míchání polymerů a jílů v tavenině bez použití organických rozpouštědel (Kim, 2019). Je tak možné například za určitých podmínek zlepšit barvitelnost. Aditiva mohou vlastnosti vylepšit, ale přináší s sebou často obtíže se zvlákňováním, avšak nejsou nepřekonatelné.

1.1.2 Proces elektrostatického zvlákňování

Vlivem elektrického náboje na kapku kapaliny je způsobována nestabilita kapaliny, čímž se kapka deformuje. Při působení na polymerní roztok/taveninu jsou výsledkem jemná vlákna, s průměrem od několika nanometrů po jeden mikrometr, nebo drobné kapky (Alghoraibi, 2018).

Základními prvky elektrostatického zvlákňování je:

zdroj vysokého napětí, který vytváří elektrostatické pole, které formuje elektricky nabitý proud polymerního roztoku nebo taveniny utvářený **zvlákňovací tryskou**. Z polymeru se před dopadem na uzemněný **kolektor** vypařuje rozpouštědlo/ chladne tavenina a dopadají vlákna, která na kolektoru vytváří tenkou vlákennou vrstvu (Alghoraibi, 2018).

Na hrot kovové kapiláry je přiváděn vodivý polymerní roztok, na který je aplikováno elektrické pole o vysoké hodnotě intenzity. Náboj se v důsledku generovaného elektrického pole, tvořeného rozdílem potenciálů mezi kapilárou a uzemněným kolektorem, hromadí na povrchu kapky vytvořené na špičce kapiláry. Na kapku na špičce jehly působí dvě síly: povrchové napětí a elektrostatické odpuzování. Vlivem Coulombova odpuzování nábojů dochází k deformování kapky, povrchové napětí má tendenci kapku formovat (Brown, 2007). Jakmile dojde k překonání povrchového napětí elektrostatickou silou, vytváří se nestabilita, která deformuje kapku do kónického tvaru často označovaného jako Taylorův kužel (Brown, 2007; Alghoraibi, 2018). Vytvářen je jemně nabitý polymerní paprsek roztoku, nebo je proud kapaliny tříštěn na nabitě částice. Vytváření či nevytváření kapiček závisí na viskoelastických vlastnostech použitých roztoků. Příliš zředěné roztoky jsou nežádoucí, pro zvlákňování musí být koncentrace polymeru výrazně nad kritickou koncentrací. Při dostatečně vysoké intenzitě pole je paprsek vlivem interakce sil (Alghoraibi, 2018) ztenčován a dále oslabován. Během toho dochází k odpařování rozpouštědla a následně akumulaci pevných vláken na kolektoru s průměry typicky od 100 do 500 nm, někdy až pod 100 nm (Brown, 2007).

Kapilární metodu lze také modifikovat optimalizací podmínek střídavé frekvence a stejnosměrného předpětí a následně vytvářet vlákna o průměru od 100 do 200 nm. Nežádoucí může být tvorba izolovaných kapiček tvořených Rayleighovou nestabilitou, nestabilitou indukovanou elektrickým polem a bičováním. Tvorbu ovlivňuje aplikované napětí, povrchové napětí a vodivost roztoku (Brown, 2007).

1.1.3 Parametry elektrostatického zvlákňování

Úpravou parametrů procesu lze charakteristiky jako velký měrný povrch, malá velikost pórů a další (Almetwally, 2017), přizpůsobit konkrétním aplikacím a potřebám. Při výrobě mají vliv různé faktory na požadovanou morfologii a velikost vláken. Mezi tyto faktory patří viskoelastická roztoku, hustota náboje nesená paprskem a povrchové napětí roztoku (Nkabinde, 2020). Parametry ovlivňující elektrostatické zvlákňování můžeme rozdělit na procesní a materiálové dle (Almetwally, 2017; Pořáková, 2013).

Procesní parametry:

- elektrický potenciál,
- polarita elektrod,
- rychlost toku polymerního roztoku,
- hydrostatický tlak v kapiláře,
- vzdálenost mezi kapilárou a kolektorem,
- rychlost kolektoru,
- průměr zvláknovací trysky, válečku,
- parametry okolí – teplota, vlhkost a rychlost vzduchu.

Materiálové parametry:

Materiálové parametry jsou určeny vlastnostmi polymeru a roztoku. Každá z vlastností pozitivně/negativně ovlivňuje zvláknování. Jednotlivé polymery se dají úpravou parametrů do určité míry uzpůsobovat. Mají však své specifické vlastnosti, které určují jejich předpoklady pro různé aplikace.

Vlastnosti roztoku:

- **viskozita roztoku,**
- **typ rozpouštědla,**
- **koncentrace polymeru v roztoku,**
- **teplota roztoku (taveniny),**
- **povrchové napětí roztoku polymeru a aplikované napětí,**
- **elektrická vodivost roztoku.**

Vlastnosti polymeru:

- **molekulová hmotnost polymeru,**
- **distribuce molekulových hmotností,**
- **stavba molekuly polymeru – lineární/rozvětvená.**

Polyamid (PA)

Polyamidy jsou důležité vysoce výkonné technické termoplasty. Nejdůležitějšími jsou alifatické polyamidy pro svůj velký objem výroby, v tomto jsou aromatické polyamidy, kde je jedním z nejhlavnějších zástupců kevlar, až za alifatickými.

Hlavními zástupci jsou Nylon 6,6 (polyhexamethylen adipamid) a Nylon 6 (polykaprolaktam) s vynikajícími mechanickými vlastnostmi:

- **vysoká pevnost v tahu a dobrá pružnost,**
- **dobrá barvitelnost,**
- **odolnost proti opotřebení** vlivem nízkého koeficientu tření,
- **vysoká teplota tání a skelného přechodu,**
- **dobré mechanické vlastnosti i při zvýšených teplotách,**
- **odolnost proti olejům, zásadám, rozpouštědlům,**
- **nízký vznik elektrického náboje.**

Vlhkost vede ke změnám mechanických vlastností, má za následek snižování pevnosti v tahu až o polovinu (Kellie, 2016; Das, 2014; Plastic Technology, 2020). Elektrostatickým zvlákňováním bylo dosaženo vláken o průměrech 90 – 500 nm (Das, 2014). Dalším důležitým zástupcem je Nylon 6,12, který má lepší odolnost proti vlhkosti, rozměrovou stabilitu a elektrické vlastnosti; krystalinitu, teplotu tání a mechanickou odolnost má nižší (Plastic Technology, 2020).

Využití je významné pro strojírenství a průmyslové aplikace, oděvy, bezpečnostní pásy, čalounění, koberce, lana a výztuhy pneumatik (Plastic Technology, 2020). Aromatické polyamidy jsou mnohem dražší, ale mají vynikající mechanické vlastnosti. Používají se v mnoha průmyslových odvětvích s náročnými požadavky aplikace, např. lana, kabely, balistické vesty, tenisové struny, kompozit na hokejky, snowboardy, kryty proudových motorů, třecí součásti brzd, převodů, těsnění (Plastic Technology, 2020). Poloaromatické polyamidy jsou kompromisem mezi alifatickými a aromatickými polyamidy cenově i vlastnostmi. Významnými vlastnostmi je vysoká odolnost proti působení nebezpečnějších chemikálií či vysokých teplot (Plastic Technology, 2020).

Polyvinylbutyral (PVB)

Polyvinylbutyral (PVB) je termoplast amorfní, bez zbarvení, čirý a patří mezi pryskyřice. Získat lze kondenzační reakcí polyvinylalkoholu a butyraldehydu.

Základními vlastnostmi jsou, dle (Plastic Technology, 2020):

- **vynikající pružnost,**
- **dobré adhezivní vlastnosti,**
- **vynikající odolnost proti UV záření.**

PVB vždy obsahuje určité procento hydroxylových skupin, protože hydroxylové skupiny PVA nereagují s aldehydem všechny. Díky hydroxylovým skupinám má PVB velmi dobrou přilnavost k mnoha substrátům, zejména je využíváno afinity ke sklu (Carrot, 2015).

1.2 Spunbond netkané textilie

Spunbond je velice významnou a vysoce produktivní technologií pro výrobu netkaných textilií. Průměry vláken se pohybují v rozmezí desítek mikrometrů, proto spunbond nepatří mezi nanovláknenné materiály, ovšem velmi často je součástí produktů z nanovláken pro svoji mnohonásobně vyšší mechanickou odolnost. Specifickými vlastnostmi jsou: pevnost v tahu a dalším trhání, jemnost povrchu, prodyšnost. Využitelné jsou např. v oblastech: zdravotnických výrobků, prostředků osobní hygieny, obalových materiálů, filtrů, geotextilií, agrotextilií i ochranných oděvů (Jirsák, 2003).

Výrobní proces se skládá z:

- **tavení polymeru, který je ve formě granulátu,**
- **zvlákňování pomocí zvlákňovacích trysek,**
- **odtah od hubice,**
- **případně dloužení,**
- **rozkládání filamentů na plochu pohybujícího se síťového dopravníku,**
- **zpevnění vlákenné vrstvy,**
- **ořezávání okrajů, navíjení.**

Zpevněny mohou být vlákenné vrstvy při vzájemném slepení chladnoucích nedloužených vláken, chemickým nebo tepelným pojením, vpichováním.

Vrstvením mechanicky odolných netkaných textilií spunbond (s průměry vláken 15 – 35 μm) v kombinaci s vynikajícími filtračními vlastnostmi textilií typu meltblown (s průměry vláken 2 – 6 μm) lze vyrobit kompozitní netkanou textilií spojující výhody obou textilií. Využití vrstvených netkaných struktur je pro kompozitní netkané materiály typu: bariérové textilie, filtrační a separační textilie, ochranné vrstvy, ve finálních produktech jako chirurgické roušky, ochranné pracovní oděvy, postranní bariérové pásy dětských plenek. Technologie meltblown se od technologie spunbond liší především vyšší teplotou a objemem vzduchu aplikovaných na hrot hubice použitého k ztenčení vláken (Karthik, 2016).

1.2.1 Flashspinning

Modifikací technologie spunbond je flashspinning od americké firmy DuPont. Tato firma je výrobcem textilie Tyvek, která má využití pro ochranné oděvy v chemickém, jaderném a ropném průmyslu, ochranu ozbrojených sil a dalších odvětvích, také například pro tepelně izolační kombinézy pro použití v nouzových případech na Antarktidě. Tyvek má pro tyto účely dobrou pevnost, pružnost, pórovitost, paropropustnost, ale také odolnost proti kapalinám s povrchovým napětím i nižším než má voda (Horrocks, 2000).

Výroba textilie Tyvek je založena na zvlákňování z roztoku, vysoko hustotního polyetylenu ve vhodném rozpouštědle (např. freonu). Při teplotě vyšší, než je bod varu rozpouštědla, se pod tlakem rozpouští polyetylen. Ke zvlákňovací hubici je roztok transportován za konstantní teploty a tlaku. Pod hubicí se rozpouštědlo odpaří téměř explozivně vlivem nižšího okolního tlaku a následkem je rozpad filamentů na jemné fibrily, soudržné v podélném směru. Takto vyrobené vrstvy mohou být následně pojeny kalandrem, s rastrovanými válci (Jirsák, 2003).

1.3 Částice oxidů kovů

Fotokatalytická degradace škodlivých látek pomocí oxidů kovů s novými nanotechnologiemi dostává více na významu než dříve díky svojí vyšší účinnosti. Nanočástice oxidů kovů mají vysoké množství reaktivních míst díky velkému aktivnímu povrchu s mnoha krystalovými poruchami a hranami. Využití je významné pro dekontaminaci a osobní ochranu proti bojovým chemickým látkám. Nanočástice oxidů kovů mohou být naneseny na povrch textilie pro výrobu ochranného oděvu, nebo mohou být zakomponovány přímo do textilních polymerních vláken (Vaněk, 2019).

Inkorporací funkčních nanomateriálů do aktivních sorbentů je bojová chemická látka účinně zachycena a následně katalyticky degradována. Aktivním sorbentem může být aktivní uhlí, jíly na bázi bentonitu, vermikulitu, montmorillonitu. Nanočástice fixované v jílovém sorbentu jsou imobilizovány a rovnoměrně rozloženy v materiálu. Mají potom vyšší účinnost díky vyšší aktivitě částic, kterým není umožněno aglomerovat. Lepší vzájemný kontakt mezi aktivním povrchem nanočástice a molekulou sorbované látky je zajištěn značnou porozitou jílového materiálu (Vaněk, 2019).

Pro syntézu nanočástic bývá využívána metoda sol-gel, pro svou jednoduchost, nízkou cenu a produkci požadovaných strukturních charakteristik nanočástic. Produkty sol-gel metody jsou většinou amorfni, následná úprava kalcinací je potom výhodná pro modifikaci krystalové fáze, velikosti částic, specifického povrchu a morfologie nanočástic pro různé aplikace (Nkabinde, 2020).

1.3.1 Oxid titaničitý (TiO₂)

Oxid titaničitý je významný pro fotokatalytickou a katalytickou oxidaci, při které jsou organické sloučeniny rozkládány na vodu, oxid uhličitý a minerální kyseliny. Oxid titaničitý je látka bílé barvy a je sloučeninou kyslíku a titanu, v přírodě vyskytující se v několika minerálních formách (Pořáková, 2013). Využíván je pro svoji vysokou účinnost v mnoha různých oblastech od čištění odpadních vod a vzduchu, přes samočistící povrchy využívající svou silnou oxidační sílu, vysokou fotostabilitu, ekonomické, netoxické a antimikrobiální vlastnosti (Nkabinde, 2020), po příměsi do barev v kosmetickém průmyslu, pro zlepšení optických vlastností (Pořáková, 2013).

Oxid titaničitý je polovodič a jeho anatasová forma je fotoaktivní. Krystaly TiO₂ ve formě anatasu dosahují velikosti do 30 nm. K aktivaci dochází působením světla o vlnové délce kratší než 388 nm. Vznikají také povrchově vázané hydroxylové radikály. Fotokatalytický účinek závisí na velikosti a tvaru částic oxidu a jeho měrném povrchu. Částice TiO₂ jsou chemicky inertní a časově velmi stabilní. Atomy dusíku v nanočásticích TiO₂ výrazně posunují absorpci záření do spodní hranice viditelného světla. Fotokatalytické oxidy dokáží být účinné proti mikroorganismům, rozkládají však také organické polymery (Hochmannová, 2010).

1.3.2 Oxid ceričitý (CeO₂)

Oxid ceričitý je prášek žlutobílé barvy, podobný oxidu titaničitému svou schopností účinné katalýzy, netoxicitou a stabilitu má dokonce vyšší. Je vysoce odolný proti chemikáliím, fotokorozi a má silnou schopnost absorpce světla v daleké oblasti UV. Schopnost CeO₂ absorbovat a uvolňovat ionty kyslíku je rozhodující pro proces katalýzy. Pro lepší katalytickou účinnost byla prokázána efektivnost přídavku stříbra či zlata, kterou ovlivňuje také pH (Mittal, 2018).

1.3.3 Metal Organic Frameworks (MOFs)

Metal Organic Frameworks jsou nové krystalické materiály, které ve své struktuře mají uzly obsahující kov. Vyznačují se enormně velkým aktivním povrchem (tisíce až desítky tisíc m^2/g), vysokou pórovitostí a významným katalytickým účinkem díky strukturně pravidelnému uspořádání kovových iontů (Vaněk, 2019; MacGillivray, 2010). Velmi dobře prozkoumaná a používaná struktura MOF obsahující ve své struktuře zirkonium Zr-UiO-66 je schopna katalyticky hydrolyzovat látky obsahující fosfoesterovou vazbu, která je dominantním strukturním motivem nervově paralytických látek. MOFs jsou velice variabilní a multifunkční, díky možnosti volby různých kombinací uzlů a dají se tak přizpůsobit přesně danému účelu (Vaněk, 2019). Vlastnosti těchto sloučenin jsou ovlivňovány kombinací podmínek, proto je důležité zvolit vhodnou techniku syntézy, která vytváří produkt s homogenní morfologií, s malým rozptylem, vysokou tepelnou stabilitou a měrným povrchem, pro široké použití např. v automobilovém, leteckém a námořním sektoru, se značnými úsporami hmotnosti (Khan, 2019).

1.4 Aplikace částic na textilií

Mechanismu interakcí částic s různými vlákny nebývá věnována taková pozornost jako účinkům, kterých je možné docílit využitím nanočástic na textilu. Částice lze na vlákna vázat chemicky či fyzikálně, rozhodující je materiálové složení textilie. Nejvíce je navazováno na skutečnost, že atomy titanu se nejlépe vážou na karboxylové skupiny. Často je využívána především bavlna díky kovalentní vazbě z dehydratační reakce mezi hydroxylovými skupinami TiO_2 a bavlny, a tak zajistí i odolnost v praní (Senić, 2011; Radetić, 2013). Syntetická vlákna mají jedinečnou výhodu v možnosti přidání částic již v průběhu výroby vláken. Charakter ochranných vrstev oděvů z netkaných textilií je obvykle jednorázový.

1.4.1 Metody nanášení částic na přírodní vlákna

Pro bavlnu, vlnu a hedvábí bývá využívána kyselina jantarová, která zvýší počet karboxylových skupin, a tudíž zlepší vaznost TiO_2 (Senić, 2011). Pro bavlnu je také používán oxid křemičitý (SiO_2), který chrání bavlnu před negativními účinky TiO_2 (Radetić, 2013; Yuranova, 2006). Oxid křemičitý se vyskytuje v přírodní formě a může být také syntetizován. Ve své mikroamorfní formě je složen z elementárních částic/strukturních jednotek o velikosti menší než $1 \mu\text{m}$ a může být v podobě koloidního roztoku, gelu, prášku, porézního skla (Nechvilová, 2012).

V průmyslu se často používá ke zvýšení pevnosti a otěruvzdornosti ošetřených textilií. TiO_2 v kombinaci s SiO_2 jako směs koloidů je vhodná pro tvorbu fotoaktivních povlaků na bavlně, bez poškození její struktury nebo modifikace a dále také pro organické polymery, plasty a jiné materiály, které nejsou odolné vůči teplu. Povlak $\text{TiO}_2 - \text{SiO}_2$ je vysoce fotoaktivní - více než v podobě samotného TiO_2 , díky vysoké disperzi světla a strukturním účinkům přítomného amorfního oxidu křemičitého (Yuranova, 2006).

1.4.2 Metody nanášení částic na syntetická vlákna

Navázání nanočástic TiO_2 na textilií ze syntetických vláken bývá uskutečňováno na plazmatem ošetřenou textilií, na kterou se následně zachytí větší množství částic, které lépe ulpívají (Sakarkar, 2020). Dalšími metodami jsou za využití teplého/studeného plazmatu, UV, X a γ záření, elektronových a iontových svazků, vakuového napařování, radiofrekvenčně, mikrovlnami (Pořáková, 2013; Senić, 2011; Grandcolas, 2011). Magnetronovým napařováním lze nanášet anorganické nebo polymerní povlaky, např. z oxidů, nitridů. Technologie je podobná jako při upravování povrchu studeným plazmatem. Vrstvy vytvořené nasypáním mají dobrou adhezi k podkladovému materiálu, toho lze využít pro široké spektrum polymerů. Výsledkem mohou být lepší mechanické vlastnosti, biokompatibilita nebo menší mačkavost (Pořáková, 2013).

Chemicky modifikovaná polyesterová vlákna biopolymerním alginátem může poskytnout další karboxylové skupiny, které umožní vyšší obsah uložených nanočástic TiO_2 na textilií (Radetić, 2013). Alkalická hydrolyza polyesterových vláken dokáže zajistit štěpení polymerních řetězců – chemické a topografické změny vláken, enzymatické ošetření polyesterových textilií esterázou (Radetić, 2013; Senić, 2011).

Syntetizovaná polyvinylidenfluoridová membrána byla pro aplikaci nanočástic TiO_2 namáčena do roztoku polyvinylalkoholu, do kterého byly tyto částice přidány (Sakarkar, 2020).

Modifikovat vlákna lze už v rámci výroby, přidáním částic do polymerního roztoku. Částice jsou do polymerního roztoku přimíchávána ještě před samotným procesem zvlákňování, následně dojde k protlačení zvlákňovací hubicí a tím jsou následně získána vlákna obsahující částice uvnitř i na povrchu. Takto modifikovaná vlákna mají nové fyzikální a chemické vlastnosti. Elektrostatickým zvlákňováním lze získat vlákna až v nanorozměrech, která obsahují částice na povrchu (Pořáková, 2013).

Začleněním anorganických nanočástic do polymerních nanovláken je možné docílit zlepšení optických, katalytických, elektrických a tepelných vlastností jak nanovláken, tak nanočástic a vytvořit tím nanokompozitní materiál. Vlastnosti nanovláken závisí na typu zabudovaných nanočástic, jejich velikosti, tvaru, koncentraci, interakci s polymerní maticí. Nanočástice mají vliv také na morfologii a průměr vláken. Vliv nanočástic na nanovlákná se pojí s různými faktory ovlivňujícími výrobu vláken s požadovanou morfologií a velikostí. Faktory jako viskoelasticita roztoku, hustota náboje nesená paprskem, povrchové napětí roztoku, mohou být ovlivněny přísadami přidávanými do polymerního roztoku. Bylo pozorováno, že přidání nanočástic TiO_2 vedlo k významnému snížení průměru vlákna polyakrylonitrilu (PAN), při 1 a 2 hm. % TiO_2 v PAN (Nkabinde, 2020). Roztok polyvinylbutyralu byl využit v kombinaci s polymerizovaným stabilizovaným roztokem paladia jako katalyzátorem přidávaným za určitých podmínek do roztoku polyvinylbutyralu, do kterého jsou přisypány nanočástice TiO_2 (Rakap, 2011).

Polymery jako kevlar, nebyly používány jako výztuž v maticích s MOFs, kvůli drastickým změnám ve vlastnostech výsledného kompozitu, což vedlo ke špatné smáčivosti a špatné mezifázové adhezi při zpracování běžnými technologiemi. Částice MOFs jsou na vlákna typu kevlar aplikovány s využitím vysokoteplotního sprejování, či za použití chemických prostředků bez použití elektrické hnací síly, při kterém se polymer ponoří do vhodného chemického roztoku obsahujícího redukční činidlo, takže kovové ionty přítomné v roztoku se usazují na aktivovaný povrch substrátu (Khan, 2019).

1.4.3 Další metody aplikace částic na vlákenný materiál

Univerzální technikou pro různé textilní materiály se jeví stříkáací metoda nanášení vrstev, kde povrch textilu již musí mít funkcionalizovaný povrch, např. plazmatem, UV zářením (Senić, 2011; Grandcolas, 2011). Sprejováním/pokovováním pro modifikaci textilního povrchu jsou nejčastěji využívány částice zinku nebo titanu o vysoké čistotě. Částice se v komoře nanášejí na povrch vláken pomocí směsi plynu argonu a kyslíku, které jsou vedeny plynovými vstupy řízenými elektrickým zařízením. Povrstvena je jedna strana vlákenné vrstvy, tloušťku povrstvení lze stanovit. Zvýšením množství kyslíku ve směsi v reakci s argonem a atmosférického tlaku vede k tvorbě oxidu zinečnatého na povrchu vláken. Pórovitost a drsnost povrchu závisí na tloušťce povrstvení a agregačních místech na povrchu (Pořáková, 2013).

Další účinnou metodou nanášení nanočástic se ukázalo nanášení střídavým ponořováním do dvou roztoků s opačnou polaritou (Senić, 2011). Tímto způsobem byly nanoseny titanátové nanotrubičky modifikované WO_3 na vojenský textil (50% bavlna-polyamid). Jako pozitivně nabitý roztok polyelektrolytu byl použit polyethylenimin.

Metoda sol-gel zahrnuje postupy pro přípravu krystalických materiálů. Pro ty je specifická homogenizace výchozích složek ve formě roztoku, převod na sol a následně gel při zachování homogenity. Výchozími surovinami pro přípravu těchto koloidních roztoků bývají alkoxyd kovů pro jejich snadnou reakci s vodou. Připravený koloidní roztok je aplikován na předem připravené vlákenné vrstvy. Přebytek sol-gel roztoku je z vlákenného substrátu dostáván pomocí metanolu. Pro tuto metodu je možné použít částice TiO_2 . Textilie zůstává porézní a distribuce částic na povrchu je rovnoměrná, bez agregace (Pořáková, 2013).

1.5 Vrstvy s aktivním uhlím

Aktivní uhlí je významný adsorbent s velkým měrným povrchem a vysokým stupněm povrchové reaktivity díky své mikroporézní struktuře. Je schopno na svůj povrch vázat atomy či molekuly plynu, kapaliny, nebo pevné látky účinkem mezipovrchových přitažlivých sil (Ulman, 2019).

Využívány jsou adsorbenty jako filtrační média pro látky znečišťující vzduch, vodu. Dají se použít pro mnohé aplikace, např. v automobilech či dalších průmyslových odvětvích. Velmi důležité jsou na ochranu vojenského personálu a civilistů pro využití v ochranných oděvech, obličejových maskách, respirátorech, k ochraně před toxickými a jedovatými plyny, které mohou být použity při válečných a teroristických událostech (Das, 2014).

Aktivní uhlí v podobě prášku bývá rovnoměrně nanášeno na textilii, může to být netkaná, nanovlákněná vrstva, ale jsou i jiné způsoby aplikace (Masařík, 2015). Velmi významná je aplikace principu adsorpce v kompozitu s využitím uhlíkové vrstvy mezi dvěma netkanými vrstvami (Das, 2014), využitelné např. pro odstranění zápachu. Adsorpční filtr má životnost závislou na povrchu a počtu dostupných vazebných míst. Po zaplnění vazebných míst prochází částice již skrz filtr.

Rozlišujeme adsorpci, dle (Das, 2014):

- **fyzikální:** pomocí Van der Waalsových sil jsou částice slabě drženy na povrchu,
- **chemickou:** na povrchu je vytvářena chemická vazba, molekuly jsou přitahovány k povrchu a reagují, reakce je nevratná,
- **katalýzu:** chemická reakce přitahovaných molekul na povrch, bez pozměnění povrchu se reakční produkt opět vzdaluje, reakce bývá nevratná.

1.5.1 Nosný materiál pro sorbenty

Využitím aktivního uhlí pro filtrační účely se zabývá diplomová práce Kombinace známých vláknenných technik pro vytvoření vhodného nosného materiálu pro sorbenty (Ulman, 2019). V rámci této práce byla vyrobena vrstva netkané textilie zpevněné vpichováním, do které je jako sorbent inkorporováno aktivní uhlí. Částice aktivního uhlí chrání proti úniku nanovláknenná vrstva, která je dále chráněna netkanou textilií a textilií vyrobenou technologií spunbond. Vzorky byly testovány na paropropustnost, prodyšnost a úbytek částic. Pronikání nebezpečných látek bylo testováno ve Státním ústavu jaderné, chemické a biologické obrany v Brně (SÚJCHBO). Porovnávány byly vzorky se současným armádním oděvním materiálem typu FOP-96. Nově vytvořený kompozitní materiál má za účel právě nahradit současnou armádní ochranu do bojových podmínek, kde je možný výskyt chemických bojových látek. Pro armádní účely je již použití aktivního uhlí známé prostřednictvím např. výrobce značky Chemviron, který využívá tento sorbent v tkaných a pletených oděvních materiálech. Filtrační materiál s aktivním uhlím je možné využít i pro čištění vod (Ulman, 2019).

První vzorky byly vyrobeny za kontinuální výroby nanovláknenných meltblownových vrstev za současného nanášení aktivního uhlí dávkovacím zařízením. Tento postup se i po několika úpravách podmínek neosvědčil, kvůli velkému úniku částic sorbentu do okolí přístroje a dále do laboratoře. Výsledný vzorek byl málo objemný a byl málo rezistentní vůči pronikání nebezpečných látek. Další vzorky byly zhotoveny z již hotových textilních vrstev a byly následně vrstveny. Problémy s nanášením částic aktivního uhlí vedly k manuálnímu nanášení prášku roztíraného pomocí destičky – princip raklování. Laminací byly vrstvy fixovány za nežádoucího tavení nanovláken a nedostatečném pojení vrstev, podobně na tom bylo ultrazvukové pojení. Spojení šitím se osvědčilo, dostatečně udrželo soudržnost vrstev v kombinaci s ultrazvukem, který zocelil otvory vzniklé jehlou při šití (Ulman, 2019).

1.5.2 Výsledné vlastnosti vzorků

Pojení hotmelt vykazovalo u vzorků vysokou prodyšnost. Tavné lepidlo vytvořilo mezi vrstvami distanční mezery, umožňující průchod vzduchu. Vysoká prodyšnost však není žádoucí, způsobuje větší pravděpodobnost průniku nebezpečných látek. Na prodyšnost má vliv také množství aktivního uhlí a jeho rozptýlení v objemu a ploše textilie a drobnou měrou i objemnost textilie (Ulman, 2019).

Pro paropropustnost je podstatná pórovitost související s prodyšností a objemností. Testováním úbytku částic vzorky podstoupily statickou i dynamickou metodu a v obou obstály velmi dobře, s minimálním úbytkem částic. Odolnost proti průniku bojových látek nejlépe prokázal vzorek pojený ultrazvukem, který je také větruodolný, dobře paropropustný a neprokázal se u něj úbytek částic. Následně byly vyrobeny vzorky se sníženou plošnou hmotností, materiálově polypropylen a polyester a dále testovány jodotestem. Porovnáním s armádním oděvem typu FOP-96 mají vyvinuté vzorky vyšší rezistenční dobu proti pronikání yperitu, nižší prodyšnost – nižší prostupnost pro bojové látky. Dalšími parametry může být vrstva ještě více optimalizována (Ulman, 2019).

1.6 Dekontaminace

Dekontaminace zahrnuje ochranná opatření proti následkům působení nebezpečných látek, v případě nekontrolovaného úniku do prostředí či zneužití při teroristických akcích, válečném konfliktu nebo dalších mimořádných událostech. Můžou tak být zasaženy kontaminací: osoby, jejich oděvy, zvířata, potraviny, krmiva, techniky, dopravní prostředky, prostředky individuální ochrany, terén a další objekty a materiály. Dekontaminací jsou odstraňovány především kontaminanty z povrchů a materiálů. Cílem je kontaminanty rozložit, převést na neškodné, nebo méně škodlivé produkty (Čapoun, 2012).

Důležité je **minimalizovat**:

- zdravotnické a nenávratné ztráty,
- nebezpečí ohrožení životního prostředí,
- dobu nezbytného používání prostředků individuální ochrany.

Žádoucí je univerzální účinnost a ekonomická nenáročnost a vytvoření podmínek pro obnovení normálního života v zasažených oblastech (Vobecká, 2015).

Dekontaminace se podle druhu kontaminantu rozděluje na:

- **dezaktivaci:** odstranění radioaktivních látek,
- **dezinfekci:** odstranění biologických agens,
- **detoxikaci:** zahrnuje odmořování – rozložení či úplné odstranění chemických látek.

Základními předpoklady katalytického čištění je, dle (Pořáková, 2013):

- **rovnoměrné rozložení katalyzátoru,**
- podkladový materiál poskytující **maximální plochu a fixaci katalyzátoru.**

Pro detekci slouží průkazníkové pásky, trubičky či papírky, ty změnou své barvy během půl minuty dokáží indikovat malé koncentrace látek. Laboratorně lze využít instrumentální techniku plynovou chromatografií s hmotnostní detekcí, kolorimetrií, chemiluminiscenci nebo nukleární magnetickou rezonanci. Dále lze využít pórovité silikonové materiály, jako senzory, do kterých lze látku absorbovat do pórů a pro analýzu je využita infračervená spektroskopie. Pro detekci je využíváno také elektrochemických vlastností uhlíkových nanotrubiček (Holišová, 2014).

1.6.1 Metody dekontaminace

Metody dekontaminace mohou být, dle (Vobecká, 2015):

- **chemické:** změna chemické struktury otravné látky reakcí s odmořovacím činidlem (zvýšením koncentrace dekontaminačního činidla, vodným prostředím, organickými rozpouštědly),
- **fyzikální:** sorpcí na vhodný sorbent (odpařováním, smýváním, rozpouštěním, adsorpcí),
- **fyzikálně-chemické:** plazma tvořeno reaktivními ionizovanými plyny, které jsou schopné úplně rozložit toxickou látku,
- **mechanické:** otěr zamořeného povrchu kartáči / obrušování, otryskávání,
- **biologické:** schopnost mikroorganismů, hub, rostlin aj. rozložit chemické látky.

Metody nezaložené na chemické podstatě dekontaminovaných látek jsou univerzálnější, ale nejsou tolik účinné. Chemické reakce jsou schopné toxické látky přeměňovat na netoxické anebo méně toxické. Fyzikální metody nebezpečné látky nerozkládají, jen je dočasně odstraňují (Holišová, 2014). Dekontaminace se dá dělit také na suché a mokré metody.

Konkrétními, nejrozšířenějšími metodami dekontaminace jsou detoxikace pevnými sorbenty a detoxikace postříkáním (Vobecká, 2015). Degradace je možná hydrolýzou, oxidací, perhydrolýzou, nukleofilní reakcí s kovy/halogeny, biologicky. Formou mohou být gely, granule (Holišová, 2014). Příprava dekontaminační suspenze nebo roztoku by měla obsahovat aktivní chlor, který by při aplikaci v suspenzi nebo roztoku neměl být nižší než 2,5 % hmotnosti (Čapoun, 2012)

Fotokatalýza představuje foto-indukovanou chemickou reakci urychlenou v přítomnosti katalyzátoru. To znamená, že jak chemické světlo, tak světlo (určité energie) i katalyzátor jsou nezbytné. Fotokatalytická aktivita TiO_2 je ovlivňována řadou faktorů - krystalová struktura, plocha povrchu, distribuce, velikost nanočástic, porozita, počet částic a hustota hydroxylových skupin na povrchu TiO_2 (Senić, 2011). Fotokatalyzátory dokáží zachytit energii ze slunečního záření a využít ji pro katalýzu, kterými mohou být odbourány organické sloučeniny, nečistoty. Polovodičové nanočástice ozářené světlem o energii stejné nebo vyšší než u zakázaného pásu fungují jako malé reaktory (Holišová, 2014).

1.6.2 Bojové látky

Válečné konflikty mají omezený okruh použitelných látek vymezen vojenskými doktrínami protivníků a odvíjejícího se zbrojního úsilí. Látky bývají členěny dle účinků na lidský organismus. Předvídání látek využitých při teroristických útocích je problematičtější. Vychází ale z cílů akce, finančních a technologických možností útočníků. Žádaná ze strany útočníka bude pravděpodobně vysoká akutní toxicita, za účelem dosažení hromadného vraždění. Extrémně toxický typ látky zajistí vyvolání otravy zásahem obličejem jako předpokládané nekryté části těla. Vyhovujícími látkami jsou nervově paralytické látky, konkrétně sarin, soman, tabun, cyklosarin, VX (Čapoun, 2012).

Otravné látky se dělí na dráždivé, zneschopňující, dusivé, všeobecně jedovaté a zpuchýřující látky. Klasifikace dle vojenského účelu rozlišuje účinek na živou sílu, rychlost účinku a stálost v terénu. Nevratné ztráty dokáží být způsobeny nervově paralytickými látkami, které patří mezi látky skupiny usmrcujících. Stálost v terénu se liší, VX přetrvává až týdny, tabun, soman, či cyklosarin jsou polotrvalé, sarin je prchavý a zůstává v terénu desítky minut až hodin (Holišová, 2014).

Nervově paralytické látky jsou organické sloučeniny odvozené od kyseliny fosforečné a fosfonové, výševroucí kapaliny vytvářející oblak aerodisperzní soustavy složené z par a kapek. Látky s vysokou těkavostí, například sarin, vstupují do organismu převážně dýchacími cestami. Látky s nízkou těkavostí vytvářejí kapky o velikosti 10-100 μm , které zasahují nechráněnou kůži (Holišová, 2014).

1.6.3 Simulanty bojových chemických látek

Simulanty bojových chemických látek jsou používány pro testování v laboratořích, především kvůli jejich nižší toxicitě a lepší dostupnosti. Reakční mechanismy jsou ale podobné jako u bojových chemických látek (Holišová, 2014; Vaněk, 2016). Nové možnosti ochrany proti působení bojových chemických látek (BChL) jsou závislé na vývoji a testování fyzikálně-chemických procesů, probíhajících při vstupu těchto látek do prostředí. Určující jsou toxikologické účinky, šíření látky, reaktivita, degradace, sorpční schopnost látky, persistence v prostředí, účinnost materiálů protichemických ochranných prostředků proti pronikání dané látky. Žádný z řady simulantů nezastupuje vlastnosti BChL dostatečně (Vaněk, 2016).

Volba vhodného simulantu se liší pro testování dekontaminace, sorpce, šíření apod. Vhodnost simulantu se odvíjí od podobnosti vlastností s BChL: molekulové hmotnosti, rozpustnosti, viskozity, teploty tání a varu, hustoty, tenze par, reaktivity. Chemická struktura i velikost molekuly hrají velkou roli, rozkladné reakce by měly mít stejné nebo podobné výsledné produkty (Vaněk, 2016).

Studium účinnosti materiálů protichemických ochranných prostředků proti pronikání bojové chemické látky je složité v souvislosti s rozdílností typů použitých polymerních či jiných materiálů.

Doporučenými simulanty pro studium procesů sorpce/desorpce, degradace/hydrolyzy u bariérových materiálů jsou dle (Vaněk, 2016) například pro:

- Sulfidický yperit (HD) – 2-chlorethyl ethylsulfid (CEES), 2-chlorethyl methylsulfid (CEMS),
- Tabun (GA), Sarin (GB) – Diethyl ethylfosfonát (DEEP), Triethyl fosfát (TEP)
- Soman (GD) – Diethylester kys. fosforité (DEHP) pro sorpci/desorpci, pro degradaci/hydrolyzu DEEP, TEP a další,
- VX – 1,2-bis(ethoxykarbonyl) ethylO,O-dimethyl-fosfordithioát (Melathion).

1.7 Použití pro protichemické ochranné oděvy

Ochranné oděvy jsou vyvíjeny pro ochranu těla a zejména pak kůže před nebezpečími různého druhu, především před škodlivými účinky látek. Toxické látky jsou látky škodlivé pro lidský organismus, nejtoxičtější jsou bojové chemické látky. Průniku k lidskému tělu musí být zabráněno, vytvořením bariéry, u té hraje roli mnoho faktorů (Slabotinský, 2006). První improvizovaná ochrana proti chemickým látkám působícím na kůži byla v podobě nepromokavých pláštů, technologie postupují stále dál a je vyvíjeno úsilí zajistit větší bezpečnost a pohodlí uživatelům, kteří zasahují při nebezpečných bojových situacích.

Protichemické ochranné oděvy se dle normy ČSN EN 943-1 rozdělují podle ochranné funkce na typy, primárně dělené, dle (Kolektiv, 2012), na:

- **plynotěsné** musí splňovat požadavky na těsnost, testované ve zkoušce vnitřním přetlakem uvedené v ČSN EN 646 a **neplynotěsné** zahrnující kapalinotěsné, těsné proti postříku, prachotěsné,
- **bez nucené ventilace** a **s nucenou ventilací** obsahuje filtroventilační systém, který se skládá z čerpadla pro nasávání okolního vzduchu a několika filtrů, přes něž se filtruje vzduch tak, aby poskytoval uživateli čistý vzduch,
- **jednorázové** po použití při zásahu se likvidují, jako nebezpečný odpad **pro opakované použití** po dekontaminaci lze použít znovu.

Rozdíly v použití pro izolační/plynotěsné a filtrační/neplynotěsné oděvy jsou tak velké, že jejich využití je v obou případech nezastupitelné. U filtračních délka možného pobytu v oděvu u izolačních absolutní ochrana.

1.7.1 Izolační ochranné oděvy

Izolační protichemické ochranné oděvy jsou plynotěsné, musí zajistit bariéru mezi tělem zasahující osoby a okolní atmosférou, která může být kontaminovaná. Oděv musí být z kvalitního materiálu, spoje musí být nepropustné. Regulace přetlaku vytvářeného vydechováním vzduchu uvnitř oděvu je řízena přetlakovými ventily, kterých je na oděvu několik, aby nedocházelo k vnikání kontaminantu do oděvu (Kolektiv, 2012).

Problémem izolačních oděvů je doba použitelnosti mající vliv na přehřívání organismu, celkovou fyzickou vyčerpanost a zvýšení psychické zátěže uživatele.

Nejdůležitějšími faktory ovlivňujícími použití izolačních ochranných oděvů jsou:

- odolnost materiálu proti nebezpečným látkám,
- kapacita dýchacího přístroje,
- odvod tepla a vlhkosti z povrchu pokožky.

Ochlazování je řešeno výdechem nositele, provětráváním z dýchacího přístroje, chladicí vestou, chladicím rozvodem vzduchu uvnitř oděvu, použitím rozptýleného vodního proudu (Kolektiv, 2012).

1.7.2 Filtrační ochranné oděvy

Filtrační protichemické ochranné oděvy jsou neplynotěsné, ale zachycují plyny, páry, drobné kapky a pevné aerosoly otravných látek. Spočívají v umožnění proudění vzduchu, díky tomu je jejich použití méně časově omezené, je možné v nich pracovat až 24 hodin, s minimalizovaným přehříváním organismu. Komfort nošení je ovlivněn teplotou okolního prostředí, stresem z vykonávaného nebezpečného úkonu, fyzickou zátěží a také samotným materiálem ochranného oděvu. Záleží významně na parametrech oděvu, filtračních vrstev (Vobecká, 2015). Tyto oděvy bývají jednorázové, aktivní uhlí zajišťující adsorpční funkci, postupně degraduje (Masařík, 2015).

1.7.3 Materiálové složení

Nosným materiálem u izolačních protichemických oděvů bývá tkanina v plátňové nebo keprové vazbě. Materiály se liší podle použití, mohou mít různé úpravy. Chemická ochranná vrstva může být ve formě aplikace vulkanickým pogumováním (kaučuk) nebo nánosováním (polyvinilchlorid, polytetrafluoretylen) (Slabotinský, 2006; Kolektiv, 2012; Militký, 2002). Ochranná vrstva ochranný oděv chrání po určitou dobu – rezistenční doba, její hodnota se měří, dá se však i předvídat podle ochranné odolnosti jednotlivých druhů polymerních materiálů, liší se podle dané toxické látky (Slabotinský, 2006).

Filtrační ochranný oděv má zpravidla tři vrstvy, (Masařík, 2015):

- První (vnější) vrstva je **ochranná** – tkaná neprostupná pro hrubé nečistoty, prachové částice, i radioaktivní prachové částice. Nepropouští radioaktivní záření α a zeslabuje záření β . Hydrofobní a oleofobní úpravou lze maximalizovat ochranu proti destilovanému kapalnému yperitu, kterému jinak textilní materiály nejsou schopny odolávat. Svrchní materiál chrání další adsorpční vrstvy před mechanickým poškozením.

- Druhá (vnitřní) vrstva je **adsorpční**, netkaná textilie s aktivním uhlím, která zamezuje proniknutí chemickým otravným látkám plynného skupenství. Při vyčerpání adsorpční vrstvy již nedochází k dostatečné ochraně.
- Třetí (spodní) vrstva **odděluje** aktivní uhlí od kůže či spodního (uniformního) oblečení uživatele, jako podšívka.

Netkaná textilie využívá technologie spunbond, meltblown (Zimová, 2011). Polymery na bázi plastů bývají odolnější vůči agresivním chemickým látkám, oproti tomu kaučuky jsou zase mechanicky odolnější (Kolektiv, 2012). Například polypropylen má výhody v odolnosti proti oděru, chemikáliím a má nízkou úroveň elektrostatického náboje, polyetylen je odolný proti kyselinám a zásadám, dobrá mechanická a chemická odolnost, nepropouští vodní páru, pro kyslík, oxid uhličitý a aromatické sloučeniny je propustný, polyester je pevný, odolný proti oděru, chemikáliím a plísním, hydrofobní, termicky odolný (Zimová, 2011), bývá využíván také polyamid.

Filtrační oděv je zpravidla nošen jako další vrstva na polním oděvu. V Armádě ČR je používán FOP-96, vyroben z 65 % polyesteru a 35 % z bavlny, vazbou keprovou. Letní verze tohoto polního oděvu je vyrobena z 50 % polyesteru a 50 % bavlny, vazbou ripstop. Oba polní oděvy jsou řešené konstrukčně velmi podobně, jen neodlehčená verze má oproti té letní větší množství kapes a vyšší plošnou hmotnost textilie o 35g/m² (Masařík, 2015). Filtrační oděvy by mohly obsahovat také dekontaminační vrstvu. Vrstvit by se měly dle potřeby. Možné je použít i maskovací vzor (Vobecká, 2015). Více vrstev znamená větší ochranu, ale také menší pohybové možnosti a v místech spojů je stále vyšší riziko prostupu nebezpečné látky. Spoje oděvů jsou utvářeny svařováním nebo lepením. Spoj je ještě přelepen izolačním pásem materiálu (Kolektiv, 2012).

1.7.4 Právní a technické předpisy

Protichemické ochranné oděvy mohou způsobit i ohrožení bezpečnosti a zdraví. Základní právní předpis je zákon o technických požadavcích na výrobky. Prováděcí vyhláškou je nařízení vlády, které stanovuje technické požadavky na osobní ochranné prostředky. Předpisy vychází z práva Evropského společenství. Navazující evropské normy stanovují další technické požadavky pro zaručení základní úrovně ochrany. Pro ochranu proti chemikáliím a zejména pro ochranné protichemické oděvy je v platnosti velké množství norem (Kolektiv, 2012).

Protichemické ochranné oděvy jsou také hodnoceny koeficientem průniku vyjádřeným v procentech. Koeficient průniku je roven podílu koncentrací nebezpečné látky uvnitř a vně oděvu a vyjadřuje, kolikrát byla koncentrace nebezpečné látky ochranným oděvem snížena (Kolektiv, 2012).

1.8 Rizika nanomateriálů

Nanomateriály nejsou záležitostí pouze dnešní moderní technologie, jsou přítomné již z vulkanické činnosti, lesních požárů a dále ze spalování fosilních paliv, dopravy, svařování, kouření a dalších aktivit využívajících vysokoteplotní proces. Rozlišujeme nebezpečí nanomateriálů pro lidské zdraví a pro ekosystém a životní prostředí. V prvním případě mluvíme o toxicitě, v druhém o ekotoxicitě. Směrnice, nadnárodní, mezinárodní a světové úrovně, které nastavují testovací strategie a metody hodnocení rizik pro v průmyslu používané konvenční chemikálie, nejsou pro nanomateriály zcela aplikovatelné. Specifické vlastnosti nanomateriálů je významně odlišují – malý rozměr, povrchová reaktivita, transport přes biologické membrány, a je nutné to zohlednit (Filipová, 2012).

Základními vlastnostmi nanomateriálů, které jsou podstatné pro charakterizaci jejich možných rizik, jsou: rozměry, tvar, morfologická substruktura substance a dalšími jsou chemické složení, rozpustnost, velikost povrchu, koncentrace částic, povrchové vlastnosti (složení, náboj, adsorbované biomolekuly), přítomnost znečištění, rezidua katalyzátorů, lipofilita, hydrofobicita, biodegradabilita (Filipová, 2012).

1.8.1 Vstup nanočástic do organismu

Nanočástice mají potenciál proniknout do krevního a lymfatického řečiště a dále do orgánů (prokázána játra, ledviny, srdce, kostní dřev). Vylučovat tyto materiály organismus však také dokáže močí nebo exkrementy. Potem nebo mateřským mlékem je teoreticky také možné nanočástice vylučovat, ale to není zatím potvrzené. Pokud se látka z těla dostane rychleji (nekumuluje se v orgánech), než je její přísun do organismu, nedejde k toxickému účinku (Filipová, 2012).

Nanočástice mohou vnikat do organismu:

- **Inhalací**

Nejpravděpodobnější cestou vstupu do lidského organismu je dýchacím systémem. Částice o velikosti větší než 10 mikrometrů se zachytí v horních dýchacích cestách, menší částice se dostávají dále dýchacími cestami, nejmenší částice o velikostech v řádech desítek až stovek nanometrů se dostávají až do plicních sklípků a odtud i do krevního oběhu spolu s plyny (Filipová, 2012).

- **Intravenózní cestou**

Pro prostup kůže hrají roli faktory jako integrita kožní bariéry, kontaminace povrchu, či kožní onemocnění. Neporaněná kůže je proti nanomateriálům velmi účinná bariéra. O mnoho snazší vstup je pro nanočástice lipofilního charakteru, které jsou schopné pronikat potními žlázami, podél chlupů či vlasů. Porušená kůže, s dispozicí k suché pleťi či alergickým ekzémům, už může představovat riziko a následné systémové toxicity (ekzémy, alergické reakce, astma, celiakie, zánět střev). Kožnímu transportu je obecně věnována velká pozornost z důvodu využívání pro opalovací krémy nanočástic TiO_2 a ZnO jako UV blokátorů. (Filipová, 2012).

- **Orální cestou**

Částice se mohou do těla dostat také ústy spolu s potravou, vodou, přenosem z rukou. Nanočástice tak interagují s trávicími enzymy a tekutinami, čímž může dojít ke ztrátě specifických vlastností částic. V játrech mohou funkcionalizované nanočástice (stříbra, TiO_2 , fullereny) přijít o svůj obal, nebo se modifikovat. S nejvyšší pravděpodobností se jaterními enzymy nemetabolizují (Filipová, 2012).

1.8.2 Rizika nanočástic TiO_2

Díky fotokatalytickým vlastnostem je využíváno aplikací nanočástic TiO_2 pro dezinfekce prostředí či léčbu určitého typu nádorového onemocnění. Studie poukazují na souvislost mezi vystavením nanočásticím a oxidativním stresem. Ovšem každý materiál je nutné posuzovat zvlášť z důvodu odlišných strukturních vlastností každého nanomateriálu. Nanočástice se vyskytly v buňkách i volně v cytoplazmě, v mitochondriích a v jádře (Filipová, 2012).

V případě, kdy by nanočástice pronikla až do buňky, jádra buňky, nemusí být buňka usmrcena, ale pokud by došlo k pozměnění její genetické informace, může dojít k trvalé změně dědičné informace v DNA, což může vést ke karcinogenitě a v případě pohlavních buněk k ovlivnění plodnosti, zdraví dalších generací. Negativně působí také na kardiovaskulární systém (Filipová, 2012).

Ze studií provedených na myších bylo zjištěno:

- Byla prokázána možnost transportu nanočástic do mozku čichovým nervem.
- TiO_2 , ZnO , CeO_2 byla prokázáno jako cytotoxické a produkující ROS (produkci ROS mohou vyvolat také exogenní faktory jako ozon).
- Po působení UV záření na TiO_2 je katalyzována produkce ROS a je možné poškození DNA.
- U SiO_2 byla pozorována neurotoxicita.
- Nanočástice TiO_2 mohou být genotoxické, v jeho anatasové formě a mutagenní v závislosti na velikosti částic.
- U novorozených myších mláďat se objevil oxidativní stres po předchozím vystavení samice nanočásticím TiO_2 .

1.9 Testovací techniky

Zajištění komfortních vlastností oděvu a zároveň maximální ochrany proti škodlivým látkám je závislé na testování prodyšnosti, paropropustnosti a odolnosti proti pronikání bojových chemických látek.

1.9.1 Prodyšnost

Propustnost pro vzduch je pro textilii důležitou vlastností, která zajišťuje výměnu vzduchu mezi oděvním systémem a okolním prostředím. Při fyzické aktivitě je tak významně odváděno teplo. Ovšem při extrémnějších okolních podmínkách je naopak žádoucí výměnu minimalizovat. Na přístroji FX 3300 je měřen průtok vzduchu, vyvolaný vytvořeným tlakovým rozdílem mezi oběma povrchy testované textilie (Hes, 2005).

Prodyšnost je normou ČSN EN ISO 9237 definována jako: „*rychlost proudu vzduchu procházejícího kolmo na zkušební vzorek při specifikovaných podmínkách pro zkušební plochu, tlakový spád a dobu*“. (ČSN EN ISO 9237, 1996)

Prodyšnost lze vypočítat podílem aritmetického průměru z jednotlivých měření rychlosti průtoku vzduchu [dm^3/min] a zkoušené plochy textilie [cm^2]. To celé je ještě nutné vynásobit přepočítávacím faktorem pro výslednou jednotku [mm/s].

1.9.2 Paropropustnost

Pro termofyziologický komfort oděvů je optimálně potřeba:

- **teplota pokožky 33-35°C,**
- **relativní vlhkost vzduchu 50±10 %,**
- **rychlost proudění vzduchu 25±10cm/s,**
- **obsah CO₂ 0,07 %,**
- **nepřítomnost vody na pokožce.**

Charakterizaci termofyziologického komfortu oděvu lze uskutečnit pomocí tepelného a výparného odporu. Výparný odpor charakterizuje tepelné účinky vnímané pokožkou vznikající při odpařování potu (Hes, 2005).

Kombinace přenosu sálavého, vodivého a konvekčního tepla určuje hodnotu tepelného odporu. Pro jeho stanovení se měří tepelný tok proudící zkušebním vzorkem dle normy ČSN EN ISO 11092 (2015).

Přístroj Permetest pomocí porézního tepelného modelu lidské pokožky simuluje zavlhčováním chladící účinek pocení. Měřený vzorek je od tohoto povrchu oddělen separační folií a vzorek je z vnější strany ofukován (Hes, 2005).

Měření výparného odporu a paropropustnosti probíhá při teplotě okolního vzduchu (obvykle 20-23°C). Vlhkost v porézní vrstvě se mění v páru, která prostupuje separační folií a následně vzorkem. Snímačem je měřen výparný tepelný tok, jehož hodnota je přímo úměrná paropropustnosti a nepřímo úměrná výparnému odporu textilie. Měření je vždy nejprve prováděno bez vzorku (Hes, 2005).

Tepelný odpor je měřen pomocí suché hlavice o teplotě vyšší než teplota okolního vzduchu, v rozmezí 10-20°C, která sleduje tepelný tok odváděný ze vzorku konvekcí do okolo proudícího vzduchu (Hes, 2005).

Relativní propustnost textilií pro vodní páry při 100% propustnosti udává tepelný tok při odparu z volné vodní hladiny o průměru měřeného vzorku. Zakrytím hladiny vzorkem se tok sníží. Tento parametr není normalizovaný (Hes, 2005).

2 Experimentální část

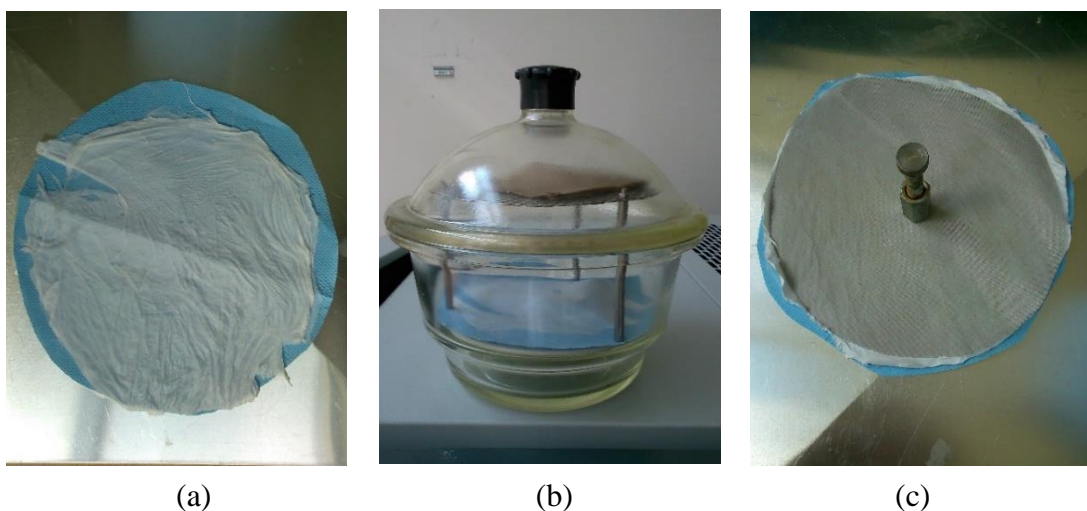
Náplní experimentální části byla výroba vzorků sestávajících z nanovláknenné vrstvy a přídavku částic oxidů kovů/MOFs, v rozměrech až nanometrových, které je snaha nanést rovnoměrně, v tenké vrstvě s minimalizovaným dalším transportem částic. Docílit stanovených požadavků lze několika způsoby. Prvotní pokusy probíhaly s využitím jílových prášků, pro snížení nákladů při testování vhodného postupu s minimálními ztrátami, při práci se sypkým materiálem s malými rozměry částic. Nanášení částic na vlákna bylo realizováno pomocí naleptání vláknenné vrstvy/aplikace disperze a následné nanesení částic, postříkem disperzí již s obsahem částic, nanesením částic přímo na neupravovaný vláknenný materiál, zvlákněním z roztoku obsahujícím částice, či nanášením částic již v průběhu tvorby vláknenné vrstvy. Nanovláknenná vrstva byla aplikována na spunbond – netkanou textilií, mechanicky odolnější, pro zachování vlastností nanovláknenné vrstvy a dodání opory. Vzorky byly následně na okrajích ultrazvukovým svařováním zafixovány, pro zabránění úniku částic ze vzorků a poté testovány na prodyšnost, paropropustnost a odolnost proti pronikání bojových chemických látek. Zjišťování vlastností jednotlivých vzorků, ještě v podobě nanovláknenné vrstvy s vrstvou částic, bylo umožněno zhotovením snímků prostřednictvím elektronové mikroskopie (SEM) pro optické vyhodnocení rozložení částic na vláknenné vrstvě. Testována byla také tendence k úbytku částic vlivem dynamického prostředí. Dynamické prostředí zajišťoval přístroj používaný pro frakcionaci, který třepáním vyklepával ze vzorků nedostatečně uchycené částice.

2.1 Příprava textilní vrstvy s přídavkem částic

Hlavním předpokladem postupů pro zhotovení textilní vrstvy s přídavkem částic oxidů kovů byl minimální rozptyl částic mimo textilií. Důvodem je vysoká cena, hodnota a reaktivnost částic oxidů kovů a MOFs. Výchozím materiálem, pro první pokusy, které měly za účel nalézt vhodný technologický postup, byl jílový vermikulit Palabora, se střední frakcí 40 μm . Vermikulit je žlutohnědé barvy a obsahuje jílové minerály v přírodě se vyskytující, např. v půdě. Modifikace jílových materiálů dokáže zajistit bariérové vlastnosti využitelné proti propustnosti yperitu (Mojžíšková, 2018). Z důvodu šetrného dávkování prášků byly vyloučeny běžné technologie nanášení. Postupy nanášení částic byly realizovány manuálně prosíváním pomocí sít.

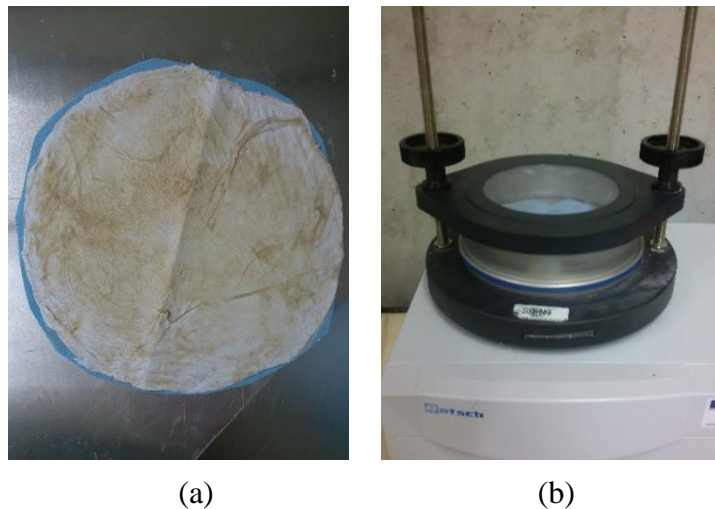
2.1.1 Naleptání a nanesení prášku

První pokusy proběhly za využití hotových PVB nanovlákných vrstvených materiálů. Objemný materiál byl rozdělen na jednotlivé menší vrstvy, které byly přeneseny na podklad z papírových utěrek. Vzorky byly zarovnané na kruhový tvar s průměrem 20 cm, viz Obrázek 1, a byly vloženy do exikátoru, který představuje uzavíratelnou skleněnou nádobu, do které byl vyroben perforovaný stojan. Na dno nádoby byla vkládána nanovlákná vrstva a na stojan byla položena papírová utěrka nasáklá etanolem, viz Obrázek 1. Etanol je rozpouštědlo používané pro PVB při zvláknování z roztoku a je možné jím také následně polyvinylbutyralová vlákna naleptávat. Vlákenná vrstva byla vystavena účinku etanolových par, které se v uzavřené nádobě rozprostírají do celého objemu. Upravená vlákna byla manuálním nanášením přes síto posypána vermikulitem Palabora. Vlákna měla tendenci se vlivem naleptání smršťovat, zatěžkáváním sítem a závažím bylo smršťování potlačeno, viz Obrázek 1. Postup byl opakován s různými časy vystavení parám v exikátoru: 2, 3, 4 a 5 minut, pokaždé byl využit nový vzorek textilní vrstvy. Vzorky byly z každého výchozího kruhového vzorku vystřiženy čtyři, jeden reprezentoval výchozí nanovláknou vrstvu, druhý byl vystaven působení etanolu, na třetí byl nanesen prášek a následně byl ponechán procesu leptání, na čtvrtý byl jí aplikován až po naleptání.



Obrázek 1 Nanovlákná vrstva na papírové utěrce (a); Exikátor s přídatným stojanem (b); Nanovlákná vrstva se sítem a závažím (c)

Hotové vzorky, viz Obrázek 2, byly ponechány za laboratorních podmínek uschnout, po dobu 10 minut. Přebytečné vrstvy částic byly ze vzorků odstraněny působením periodického pohybu s amplitudou 100 po dobu 10 minut. Jednotlivé vzorky byly vystaveny dynamickému prostředí analytického síťovacího stroje řady AS 200 firmy Retsch, viz Obrázek 2. Přístroj je primárně určen k frakcionaci podle velikosti částic, pro kontrolu surovin v oblastech vývoje a výzkumu. Výsledné nánosy částic na vláknech zobrazují snímky z elektronového mikroskopu (SEM). Snímky byly zhotoveny pro všech 16 vzorků (4 časy x 4 dílčí podoby, uvedené výše), zobrazených v kapitole 2.2.



Obrázek 2 Nanovláknenná vrstva s jílem (a);
Přístroj na frakcionaci (b)

2.1.2 Disperze a nanesení prášku

Disperze byla namíchána z vody a latexu nejprve v poměru 3:1, v objemu 100 ml, a aplikována na materiál. Při dalším pokusu byl využit poměr 10:1. Textilní materiál sestával z PVB nanovláknenných vrstev umístěných na papírové utěrce, jako mechanicky odolnějším podkladu, v kruhovém tvaru o průměru 20 cm. Disperze byla aplikována na textilii ve vodorovné poloze, ze vzdálenosti cca 30 cm. Postříkem vytvořená rovnoměrná vrstva byla povrstvena vermikulitem Palabora pomocí síta. Dávkování jílu bylo závislé na vytvoření tenké homogenní vrstvy, přibližná hodnota dávky činila 1 g jílu. Vzorky byly následně pro doschnutí ponechány 15 min ve vysokoteplotní komoře s 80 °C. Postup nanášení prášku na disperzi byl použit také s využitím oxidu ceričitého.

Nanášení prášku pomocí přístroje na frakcionaci bylo otestováno s využitím tří sít. Na horní síto byl dávkován jíl, který byl prosíván skrz druhé síto až na třetí, na které byl umístěn nanovlákný vzorek postříkaný disperzí bezprostředně před nanášením částic.

2.1.3 Disperze s obsahem prášku

Disperze ve směsi 3:1 voda a latex obsahovala vermikulit Palabora o hmotnosti cca 10 g na 100 ml. Disperze byla stříkána pomocí rozprašovače na PVB nanovláknou vrstvu na podkladové papírové utěrce. Textilie byla držena ve svislé poloze a postřík byl prováděn ze vzdálenosti 20 cm. Vzorky byly následně ponechány do dalšího dne k zaschnutí.

Tento postup byl opakován také pro oxid ceričitý s disperzí v poměru 10:1.

2.1.4 Samotné nanesení prášku

Nanesení jednotlivých prášků bez použití dalších úprav textilie měla jako základ nanovláknou vrstvu vloženou na podkladovou vrstvu, z prášku byla vytvořena souvislá vrstva rozprostřená v nádobce o rozměrech mírně větších, než byl vzorek textilie. Vzorek byl poté svou nanovláknou částí na homogenní vrstvu prášku krátce přitisknut. Za účelem odstranění přebytečných vrstev prášku bylo následně vzorkem třepáno.

2.1.5 Zvlákňování z roztoku s obsahem prášku

Zvlákňování z roztoku probíhalo pomocí elektrostatického střídavého zvlákňování. Využito bylo 10 hm. % roztoku polyvinylbutyralu, PVB jako polymerního materiálu, s rozpouštědlem denaturovaným etanolem Technisolv (96%). První pokusy proběhly s využitím jílu, následně i s oxidem ceričitým. Poměr prášku v roztoku byl upravován v průběhu zvlákňování pro dosažení maximálního možného množství prášku v objemu roztoku, který je ještě přijatelný, aby docházelo k tvorbě vláken. Testováno bylo dynamické zvlákňování pomocí pumpy a bylo otestováno i statické zvlákňování z tyčky.

Zvlákňování z tyčky probíhalo při technologických parametrech: zvlákňovací napětí 30 kV, průměr hlavy tyčky 22 mm, vzdálenost od bubnu 250 mm, rychlost navíjení bubnu 35 ot/min.

2.1.6 Zvlákňování a nanesení prášku

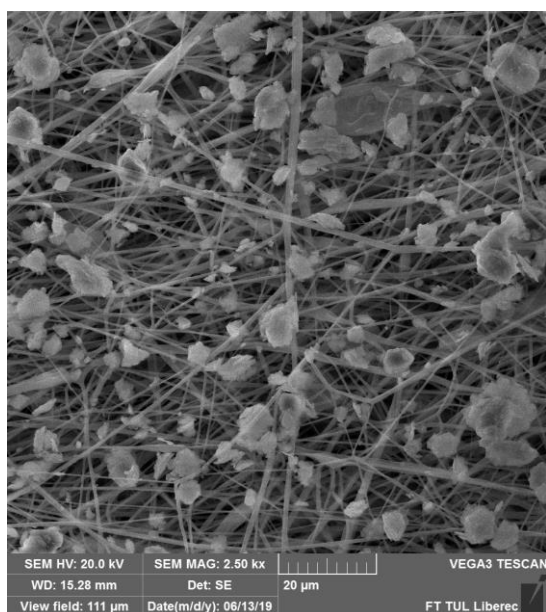
Pomocí elektrostatického střídavého zvlákňování z jehly byly vyrobeny vzorky z polyamidu s využitím oxidu titaničitého. Do roztoku polyamidu, s rozpouštědlem z kyseliny octové a kyseliny mravenčí v poměru 1:1, byla přimíchávána kyselina sírová, která napomáhá polyamidu k tvorbě vláken. Při následném zvlákňování byly nejdříve na kolektoru na spunbondovém podkladu tvořeny nanovláknenné vrstvy a vždy po pěti minutách bylo zvlákňování zastaveno, ponechán byl horizontální pohyb a rotace válcového kolektoru a pomocí malého síta byl manuálně nasypán oxid titaničitý v homogenní tenké vrstvě, na kterou bylo spotřebováno 5 g prášku. Postup dále pokračoval stejným způsobem, celková doba zvlákňování byla 20 min, s pozastavením vždy po 5 minutách pro nanesení prášku, po posledních 5 minutách už nebyl prášek nanášen. Celková spotřeba oxidu titaničitého činila 15 g. Poslední vrstvy nanovláken byly fixačního a ochranného charakteru. Vyrobené vrstvy byly spolu se spunbondovým podkladem sejmuty z kolektoru a přeloženy v příčném směru tak, že spunbond chránil nanovláknennou plošnou textilií z obou stran.

Další vzorky byly vyrobeny s částicemi MOFs obdobným způsobem. Z jehly byl zvlákňován roztok polyvinylbutyralu pomocí střídavého proudu. Vláknenná vlečka byla zachytávána na rotující váleček s přidanou spunbondovou vrstvou a během tvorby vláknenné vrstvy na válečku byly nanášeny částice MOFs. Nanášení prášku probíhalo s využitím výchozí malé lahvičky s práškem MOFs, na kterou bylo místo víčka připevněno jemné kovové síto. Prášek byl aplikován na usychající vláknenné vrstvy za soustavných úderů do lahvičky pro řádné dávkování. Proces probíhal po dobu dvou minut. Hotové vrstvy byly z válečku sňaty odmotáním spunbondové vrstvy, jejíž nepovlákněnou částí byla pokryta nanovláknenná vrstva i z druhé strany. Výsledné vzorky měly velikost, v závislosti na válečku, o rozměrech 20 x 30 cm.

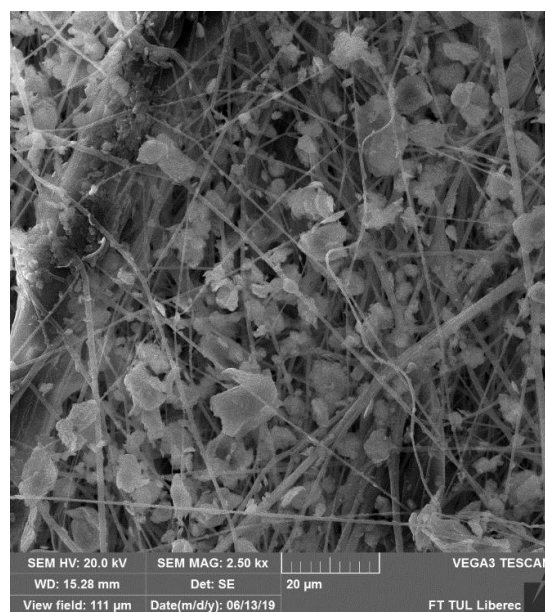
2.2 Morfologická charakterizace vyrobených vzorků

Morfologie vyrobených textilních kompozitů sestávajících z nanovláknenné vrstvy a částic byla zkoumána prostřednictvím snímků zhotovených na skenovacím elektronovém mikroskopu (SEM), které umožňují opticky vyhodnocovat strukturu materiálů s rozměry až nanometrovými. Bližší analýza je možná pomocí programu ImageJ FIJI, který umožňuje obrazovou analýzu a vyhodnocuje průměr vláken, velikost a počet částic apod.

Postup **naleptávání** vláken a **nanášení** jílu vycházel z možnosti aplikovat prášek na předem upravený povrch vláken, ale také aplikovat prášek ještě před úpravou. Výsledkem je zachycení částic odlišným způsobem. Ilustrativní snímky byly vybrány z výroby vzorků za působení par etanolu 4 minuty (viz Obrázek 3). První snímek ukazuje rozprostření částic po povrchu nanovláknenných PVB vrstev, docílené naleptáním a následným nanesením prášku. Druhý snímek zobrazuje začlenění částic do struktury textilie, kterého bylo docíleno nanesením jílu ještě před naleptáváním. Ze strukturního hlediska je výhodný druhý způsob aplikace prášku, protože zajišťuje maximální možné ulpívání částic na naleptávaných vláknech.



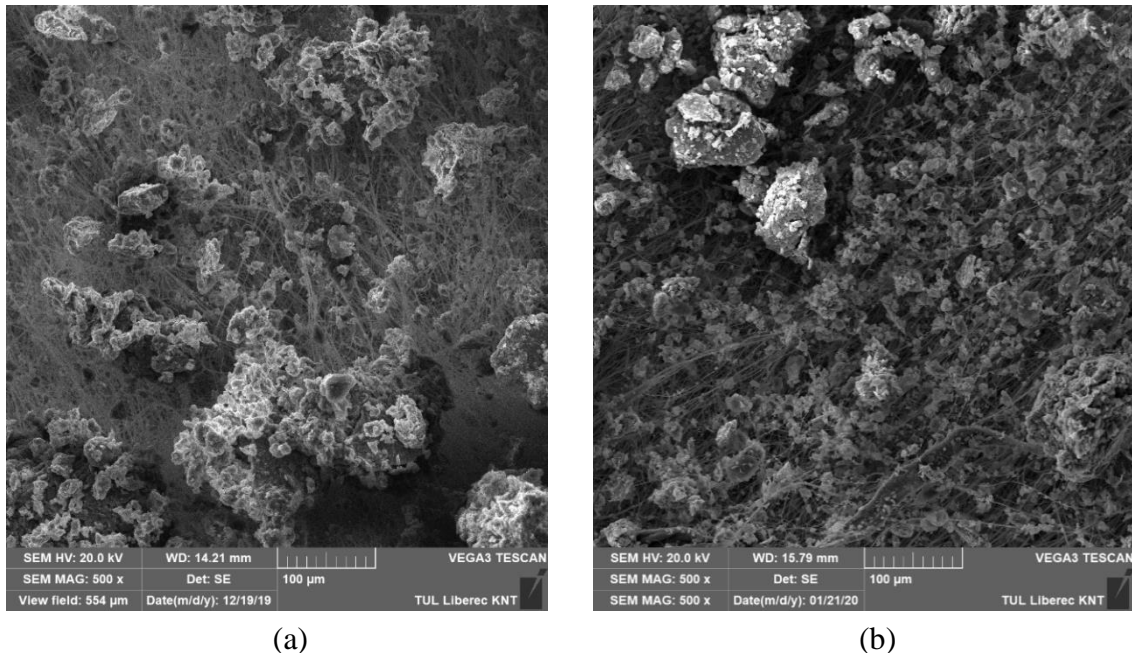
(a)



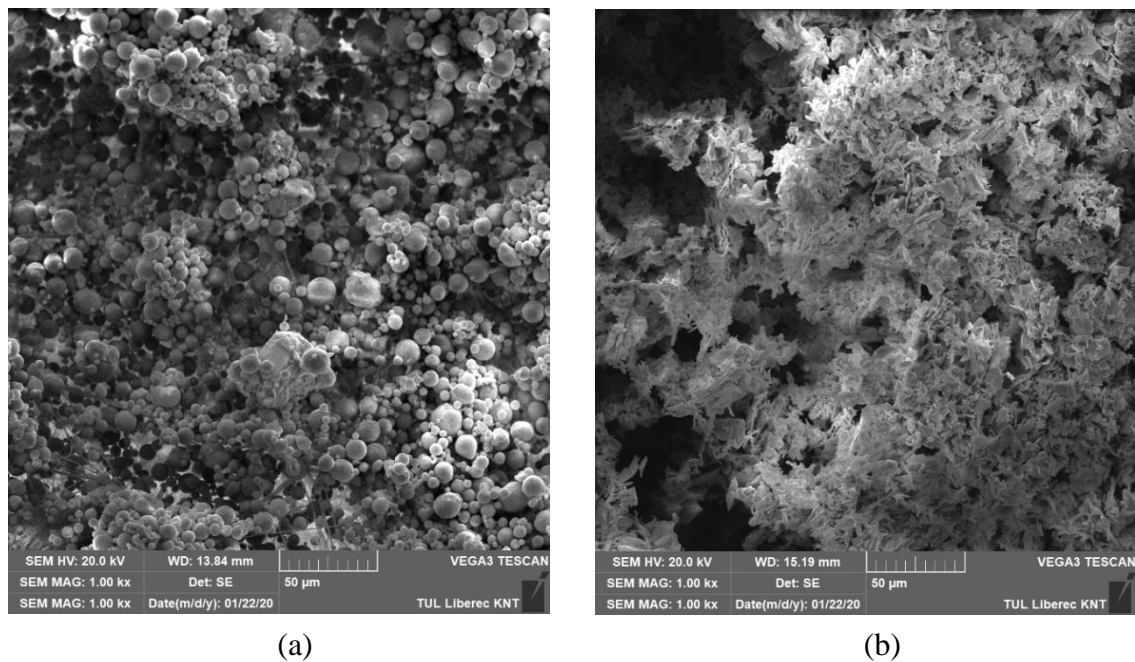
(b)

Obrázek 3 Naleptávané nanovláknenné vrstvy s jílem, zvětšení 2500 x, nanesení prášku po naleptání (a), nanesení prášku před naleptáním (b)

Disperze při koagulaci měla za následek shlukování částic, vedoucí i ke snížení jejich povrchu. Obrázek 4 zobrazuje jíl nanesený na disperzi v poměru 3:1, směs tvořila větší shluky, než jsou viditelné u disperze s poměrem 10:1. Snímky ukazují nejmenší rozdíl, který se na snímcích projevil. Na snímcích je vidět, že důsledkem použití zředěnější disperze není jen menší shlukování částic, ale také velké množství částic samostatně rozprostřených po celé ploše nanovlákněné vrstvy.



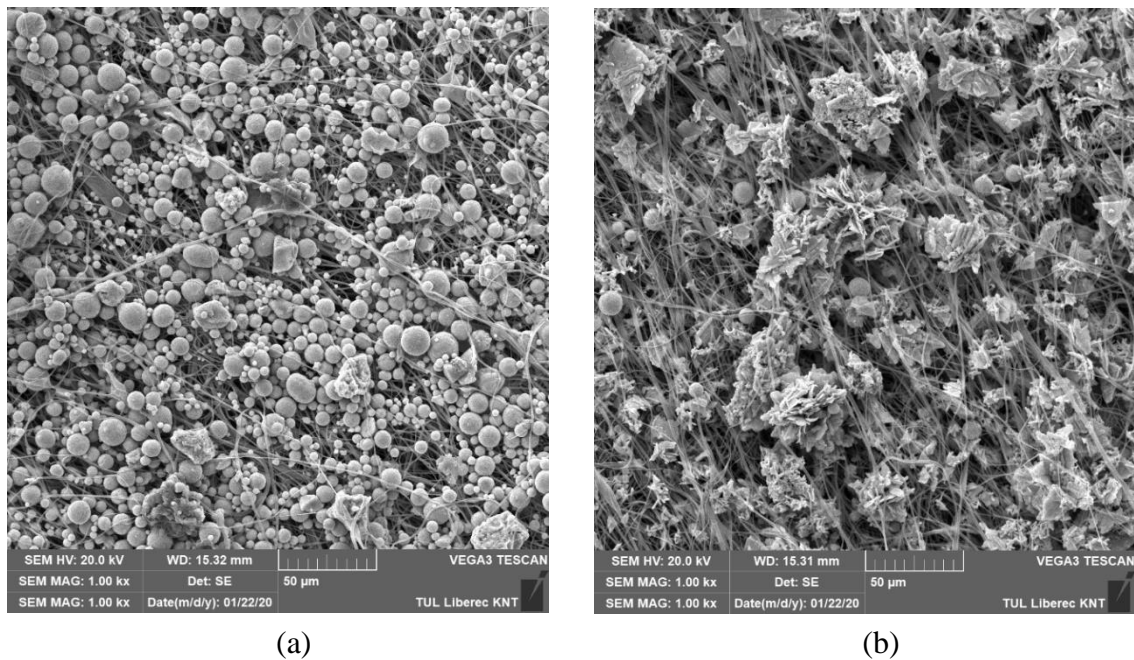
Obrázek 4 Nanovlákněné vrstvy s jílem naneseným na disperzi, zvětšení 500 x, disperze v poměru 3:1 (a), v poměru 10:1 (b)



Obrázek 5 Nanovlákněné vrstvy s oxidem kovu naneseným na disperzi, zvětšení 1000 x, oxid ceričitý forma 1 (a), oxid ceričitý forma 2 (b)

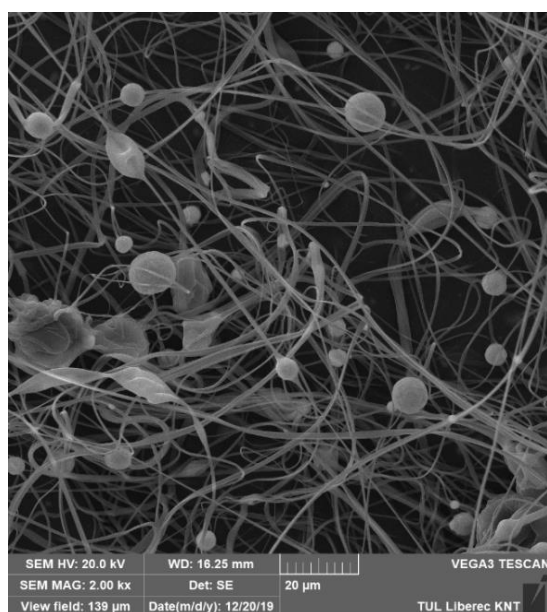
Použití disperze v kombinaci s oxidy kovů na snímcích také ukazuje, že při schnutí disperze vlivem koagulace dochází k následným shlukům částic (Obrázek 5). Oxid ceričitý první formy má k shlukování menší sklon a zachovává vláknitou strukturu. Druhá forma oxidu ceričitého při této metodě nanesení na disperzi vytváří vlastní souvislou vrstvu, ve které zaniká vláknitý charakter kompozitního textilního materiálu. Rozdílnost je patrná v odlišném tvaru a členitosti částic.

Rozptýlení částic v disperzi a následná aplikace na nanovláknennou vrstvu vedla k rovnoměrnějšímu rozložení částic na povrchu, viz Obrázek 6, než tomu bylo u nanášení na disperzi. Oxid ceričitý, forma 1, tvoří méně shluků a je lépe rozptýlený po délce vláken v ploše nanovláknenné vrstvy, díky svému méně členitému povrchu. Oxid ceričitý druhé formy se zase díky své strukturovanosti lépe zachycuje ve vláknenné struktuře.

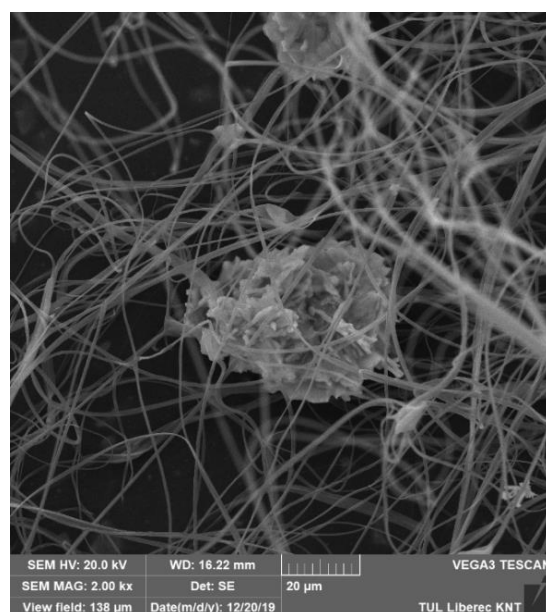


Obrázek 6 Nanovláknenné vrstvy s oxidem kovu rozptýleným v disperzi, zvětšení 1000 x, oxid ceričitý forma 1 (a), oxid ceričitý forma 2 (b)

Na následujících snímcích (Obrázek 7) je zobrazen detail částic oxidu ceričitého obou z použitých forem. Na prvním snímku lze vidět částice drobné, kulovitého tvaru a na druhém shluk částic oxidu ceričitého s velmi strukturovaným povrchem. Vzorky byly vyrobeny metodou **zvlákňování z tyčky** s obsahem oxidu kovu v polymerním roztoku. Oxid titaničitý má drobnější částice než obě použité formy oxidu ceričitého a má částice zaobleného tvaru, viz Obrázek 8. Mají avšak velkou tendenci se shlukovat.

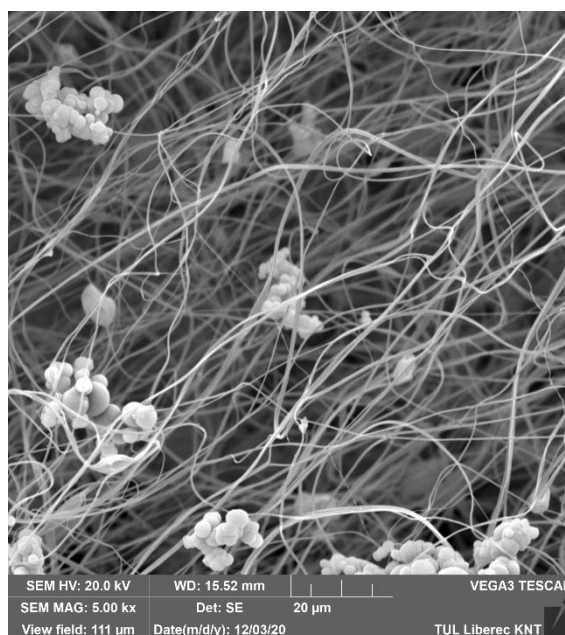


(a)



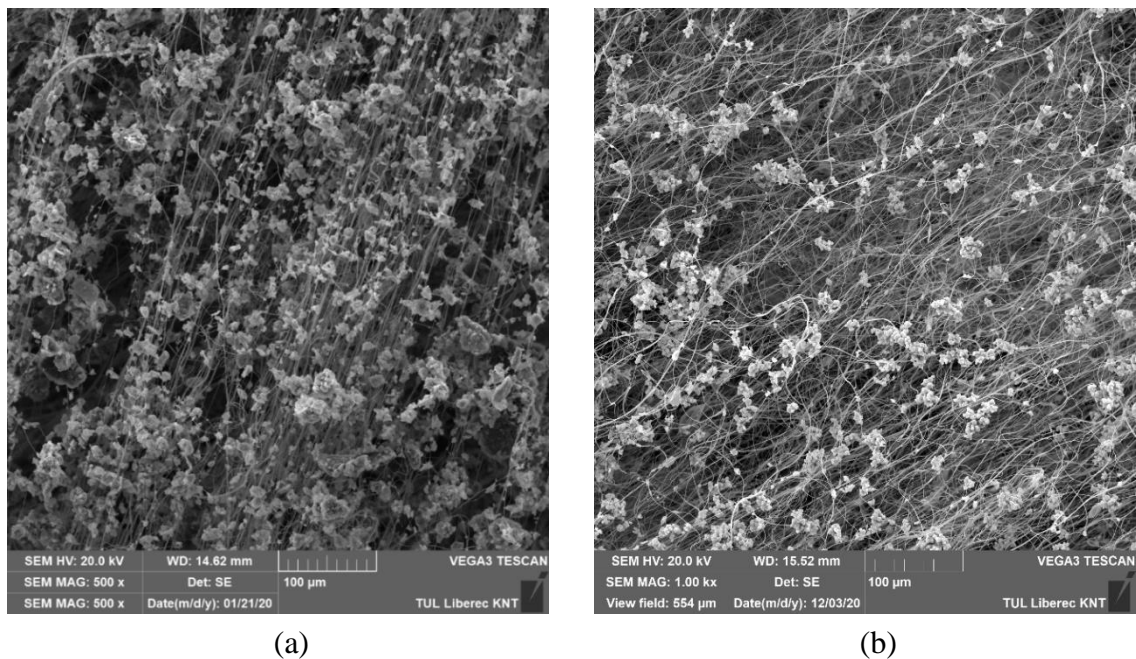
(b)

Obrázek 7 Nanovláknenné vrstvy s oxidy kovu ze zvlákňování z tyčky, zvětšení 2000 x, oxid ceričitý forma 1 (a), oxid ceričitý forma 2 (b)

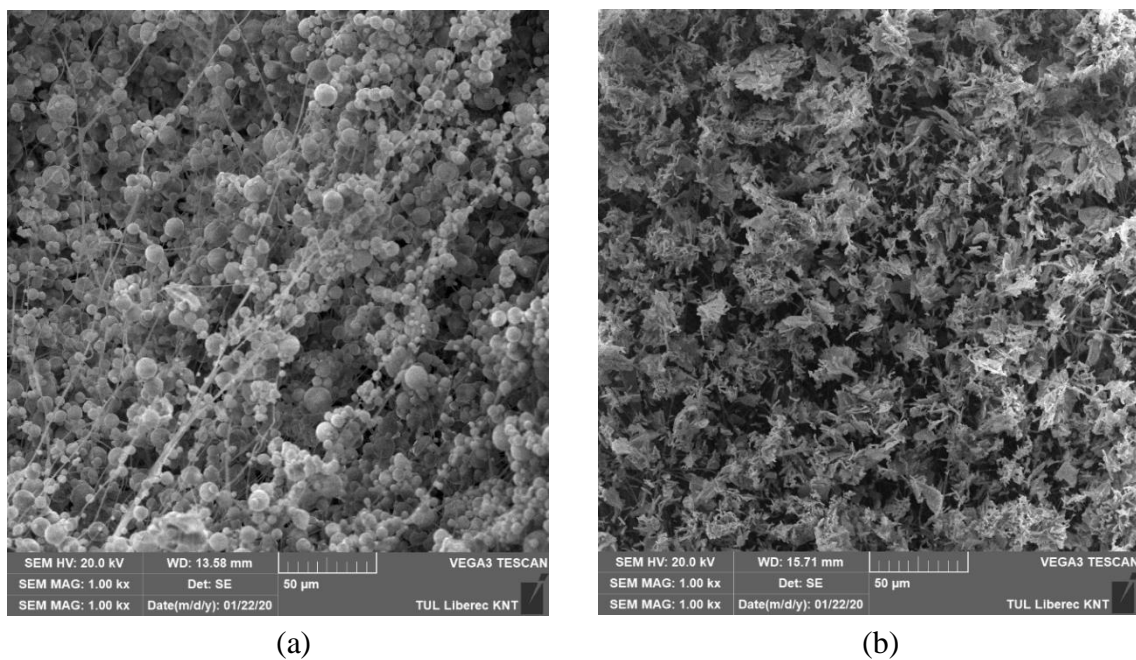


Obrázek 8 Nanovláknenné vrstvy s nanoseným oxidem titaničitým, zvětšení 5000 x

Samotným nanášením prášku bylo docíleno rovnoměrné distribuce částic po celé nanovlákněné vrstvě u všech použitých prášků. Vermikulit Palabora a oxid titaničitý byl nanesen v menším množství, viz Obrázek 9. Oxid ceričitý v obou formách dosáhl velmi rovnoměrného rozprostření částic po celé ploše vlákněné vrstvy. Patrné je také prostoupení do hlubších vrstev textilie, viz Obrázek 10. Druhá forma oxidu ceričitého opět zastihuje vlákněnou strukturu textilního kompozitu s částicemi.

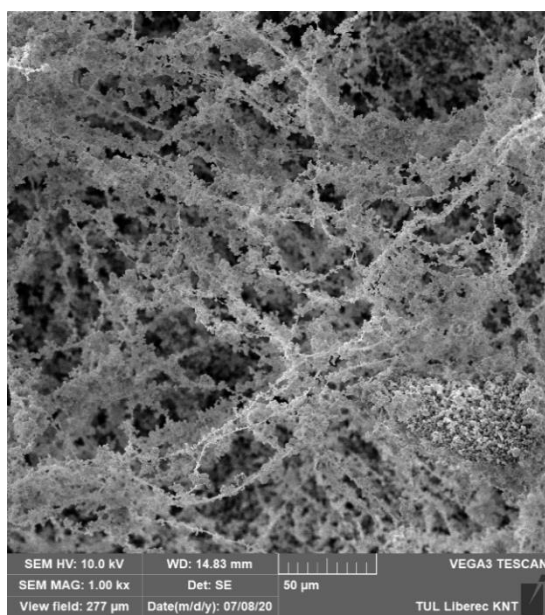


Obrázek 9 Nanovlákněné vrstvy s naneseným práškem, (měřítko 100 µm), jíl (a), zvětšení 500 x, oxidu titaničitý (b), zvětšení 1000 x

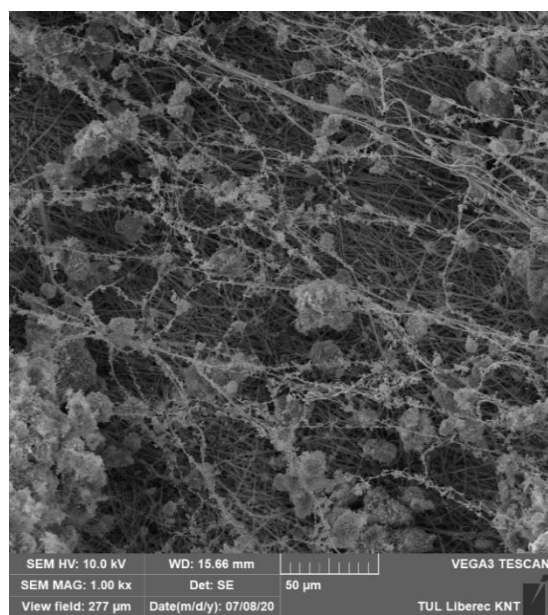


Obrázek 10 Nanovlákněné vrstvy s naneseným oxidem kovu, zvětšení 1000 x, oxid ceričitý forma 1 (a), oxid ceričitý forma 2 (b)

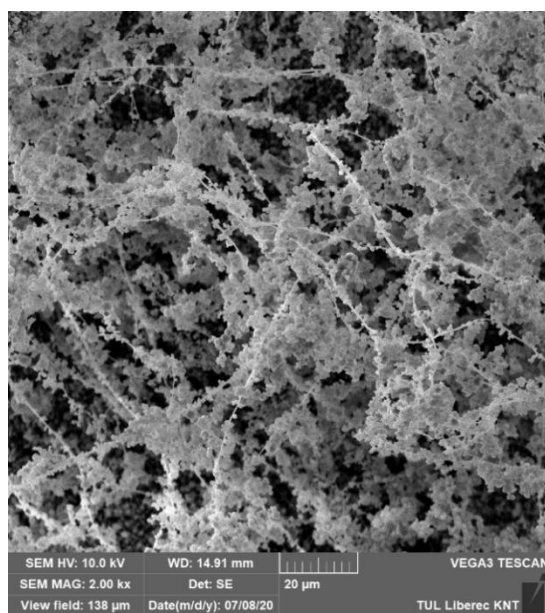
Částice MOFs mají velmi jemný rozptýl a velmi malé částice, jak je to patrné na snímcích (Obrázek 11). Překonáním shlukování částic je pak možné docílit vlákněných struktur obsypaných částicemi, které kopírují linie vláken. Druhá forma MOFs má větší tendenci se shlukovat a méně potom kopíruje vlákněný charakter, oproti tomu částice první formy MOFs (Zr-UiO-66) pronikají i do hlubších vrstev nanovlákněného materiálu a ulpívají na povrchu vláken po celé jejich délce. Rozdíl jako u oxidu ceričitého je v členitosti povrchu částic. Strukturovanější, členitější částice se více shlukují, zaklesávají do sebe. Částice hladšího povrchu lépe kopírují strukturu vlákněného materiálu.



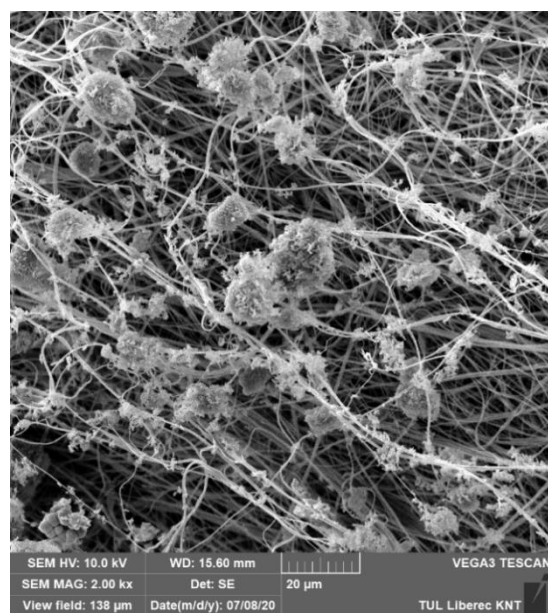
(a)



(b)



(c)



(d)

Obrázek 11 Nanovlákněné vrstvy s MOFs, zvětšení 1000 x (a)(b), 2000 x (c)(d), MOFs forma 1 (a)(c), MOFs forma 2 (b)(d)

2.2.1 Velikost částic

Velikost částic má vliv na fotokatalytické vlastnosti, proto byly snímky podrobeny obrazové analýze pomocí programu ImageJ FIJI, který umožnil měření velikosti částic. Částice mohou mít při zvlákňování také vliv na průměry vláken, snímky z elektrostatického zvlákňování z roztoku polymeru s obsahem prášků ovšem neumožnily měření průměrů vláken z důvodu nedostatečného zvětšení, snímky byly primárně pořizovány pro hodnocení rovnoměrnosti vrstev nanesených částic a porovnání jednotlivých metod nanášení prášků, případně porovnání částic. Na samotné nanovlákněné vrstvy nebyly kladeny specifické požadavky.

Měření částic v programu ImageJ zahrnovalo nejdříve úpravu snímků do 8 bit formátu a zaznamenání měřítka pro správnou kalibraci. Úprava a kalibrace byla prováděna u každého proměřovaného snímku ze SEM z vybraných vzorků s nanesenými částicemi na vlákna. Snímky byly vybírány s měřítkem 50 – 10 μm , v závislosti na velikosti objektů a vyhotovených snímcích. Měření velikosti částic bylo prováděno pomocí funkcí Freehand Selection / Oval v závislosti na nepravidelném tvaru, nebo pravidelném kulovitěm tvaru částic, následně byl změřen a zaznamenán obsah plochy pomocí funkce Measure. Statistický význam mají data z objektů naměřených právě jednou, z toho důvodu byla po funkci Measure zařazena také funkce Draw, která umožňuje vytvořenou linii ponechat zakreslenou. Měření bylo pro každý typ objektu provedeno 100x. Naměřená data byla statisticky vyhodnocena a zaznamenána do tabulky.

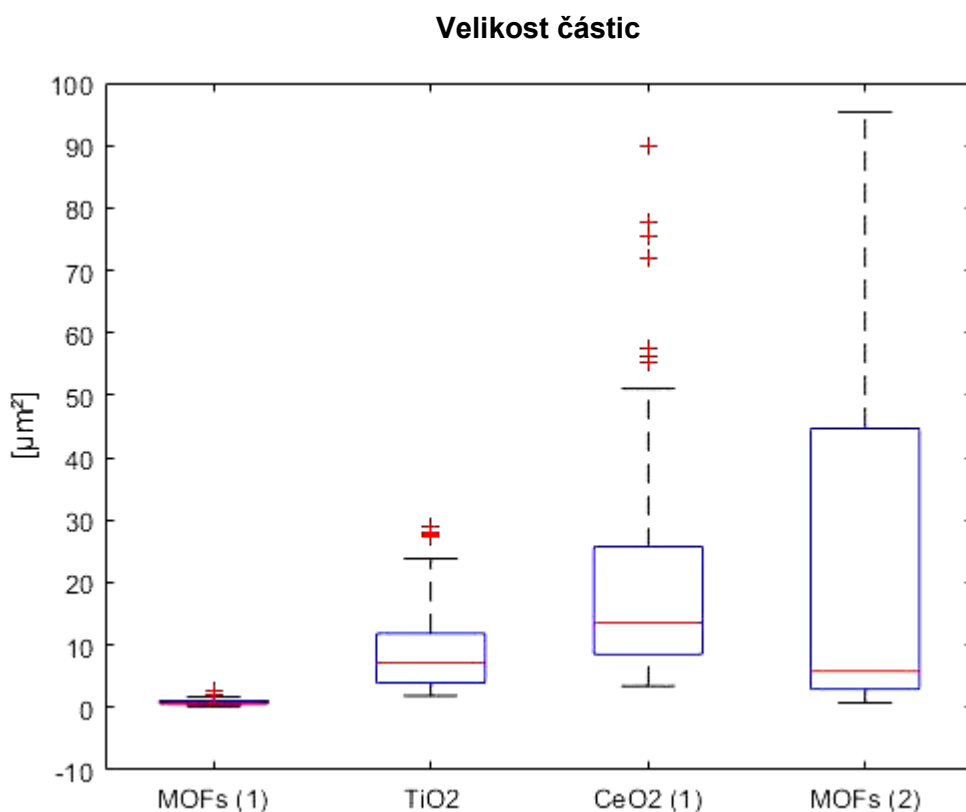
Střední hodnota velikosti částic (Mean) je určována z plochy částic na snímcích. Porovnáním hodnot získáváme informaci, viz Tabulka 1, že částice MOFs (1) byly nejmenší se střední hodnotou v desetinách μm^2 , TiO_2 v jednotkách, CeO_2 (1) a MOFs (2) v desítkách a CeO_2 (2) ve stovkách μm^2 . Největší rozdíly byly dány tvarem částic. Částice s méně členitým tvarem byly dobře rozlišitelné pro jejich měření a také se méně shlukovaly, oproti tomu strukturovanější částice tvořily obrovská seskupení bez rozlišitelnosti jednotlivých součástí. Rozdílnost nebyla významná v minimální dosahované velikosti, ale spíše v maximální. Maximální velikost částic se lišila mezi druhy částic od jednotek až k tisícům μm^2 . Rozdíly ve velikostech částic u jednotlivých druhů práškového materiálu charakterizuje směrodatná odchylka (SD). Grafické zobrazení velikostí částic pomocí krabicového grafu viz Obrázek 12.

Tabulka 1 Vypočtené základní statistické hodnoty naměřených dat velikosti částic

Velikost částic [μm^2]					
	MOFs (1)	TiO ₂	CeO ₂ (1)	MOFs (2)	CeO ₂ (2)
Mean	0,89	9,14	23,10	37,74	261,89
SD	0,47	6,60	26,05	78,40	504,34
Min	0,18	1,87	3,42	0,80	7,12
Max	2,70	28,94	126,51	578,68	3771,80

Medián, představující robustní odhad polohy dat, u částic MOFs (2) svým vychýlením od středu obdélníku upozorňuje na sešikmení dat (viz červená horizontální úsečka), u částic CeO₂ je už sešikmení dat menší a u TiO₂ je minimální. Částice MOFs (1) mají vůči ostatním částicím v tomto měřítku velmi úzké rozložení velikostí částic. Červené plusy vyznačující vybočující hodnoty u částic MOFs (2) nebyly zahrnuty, stejně jako částice CeO₂ (2) celkově z důvodu příliš vybočujících dat.

Velikost částic ovlivňuje fotokatalytickou aktivitu. Menší velikosti částic mají větší citlivost a fotokatalytickou aktivitu (Khan, 2013).



Obrázek 12 Grafické zobrazení velikostí částic pomocí krabicového grafu

2.3 Testování vyrobených vzorků

Cílem diplomové práce bylo dosáhnout výroby materiálu s lepšími výsledky, než poskytuje armádní bunda s označením FOP-96. Armádní bunda FOP-96 je zhotovena ze tří částí: podšívka, vpichovaná textilie s dispergovaným aktivním uhlím a vrchní tkaný materiál s voděodolným a oleofobním zátěrem.

Vlastní vzorky pro následující testování jsou dílčí částí celého zamýšleného oděvu. Vzorky byly vyrobeny postupem zvlákňování a nanesení prášku. Tento postup byl nejlépe realizovatelný, splňující všechny potřebné požadavky, navíc zajišťující dobrou reprodukovatelnost i dostatečnou možnost obměny použitých materiálů. Na to bylo navázáno a pro účely komplexních výsledků ochranného oděvu byly vyrobeny stejným postupem také vrstvy s aktivním uhlím. Následně byly vytvořeny vzorky sestávající z nanovlákněné vrstvy s menší dávkou aktivního uhlí, nanovlákněné vrstvy s větší dávkou aktivního uhlí a mezi nimi umístěnou nanovlákněnou vrstvou s oxidem titaničitým. Jednotlivé nanovlákněné vrstvy s částicemi byly od sebe odděleny spunbondem. Vzorky byly dvou typů: u prvního, typu A, měla každá nanovlákněná vrstva z obou stran svou vrstvu spunbondu a následně byly vrstveny, u druhého, typu B, měla každá nanovlákněná vrstva pouze jeden podkladový spunbond a následně došlo k vrstvení. Svrchní vrstvou byla u obou typů vzorků tkanina. Vzorky byly po stranách ultrazvukově spojeny pro fixaci materiálu. Tyto vzorky byly testovány na prodyšnost, paropropustnost a odolnost proti pronikání bojových chemických látek následně:

2.3.1 Prodyšnost

Prodyšnost byla testována pomocí přístroje SDL Atlas M021A. Naměřené hodnoty a vypočtený aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou jsou uvedeny v následující tabulce (Tabulka 2). Armádní bundě FOP-96, byla naměřena prodyšnost, v rámci diplomové práce Ivana Ulmana (2019), s hodnotou větší než 200 [$l \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$]. Uvádí také, že materiály s hodnotami prodyšnosti pohybujícími se kolem 10 [$l \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$] vykazují vynikající větruodolnost.

Tabulka 2 Naměřené hodnoty prodyšnosti vzorků A a B, vypočtené statistické hodnoty

Prodyšnost [$l \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$]									
Vzorky								Mean	SD
A	15,3	10,7	10,4	12,6	13,8	10,4	11,0	12,0	1,9
B	17,1	17,0	21,7	20,5	18,2	17,7	17,0	18,5	1,9

Výsledné hodnoty prodyšnosti vyrobených vzorků byly výrazně nižší (s průměrnými hodnotami $12 [l \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$ a $18,5 [l \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$), než u armádní bundy ($200 [l \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$). Vzorek A měl nižší prodyšnost, v závislosti na použití více vrstev spunbondového materiálu, než u vzorku B. Nižší prodyšnost poukazuje na vyšší ochranu před extrémními okolními podmínkami a nižší odvod tepla z oděvní soustavy. Vrstva částic na textilií z větší ohybovou tuhost, ale nesníží prodyšnost (Senić, 2011).

2.3.2 Paropropustnost

Testování probíhalo na přístroji Permetest. Pro hodnocení paropropustnosti jsou měřeny hodnoty výparného odporu – RET, charakterizující paropropustnost a relativní propustnost textilie pro vodní páry. Naměřené hodnoty spolu se statistickými (aritmetický průměr a směrodatná odchylka) jsou uvedeny, viz Tabulka 3.

Tabulka 3 Naměřené hodnoty paropropustnost vzorků A a B, vypočtené statistické hodnoty

Paropropustnost									
Vzorky								Mean	SD
A	RET [$Pa \cdot m^2 \cdot W^{-1}$]	8,3	8,5	8,8	8,6	8,8	8,9	8,7	0,2
	Relativní [%]	48,0	48,0	47,0	48,0	48,0	48,0	48,0	0
B	RET [$Pa \cdot m^2 \cdot W^{-1}$]	11,9	9,8	11,0	11,7	10,2	10,2	10,8	0,9
	Relativní [%]	40,0	45,0	42,0	41,0	45,0	45,0	43,0	2,0

Výparný odpor (RET) byl armádní bundě FOP-96 naměřen a vyhodnocen jako uspokojivý, s hodnotou $14,4 Pa \cdot m^2 \cdot W^{-1}$ (Ulman, 2019). Testované vyrobené vzorky spadají do o stupeň lepší kategorie než armádní bunda, s průměrnými hodnotami RET $8,7 Pa \cdot m^2 \cdot W^{-1}$ a $10,8 Pa \cdot m^2 \cdot W^{-1}$, které jsou vyhodnocovány jako dobré. Vzorek A, s nižší hodnotou RET, vykazuje vyšší paropropustnost, než vzorek B. Relativní propustnost textilií pro vodní páry, u vzorku A při 48% propustnosti udává vyšší tepelný tok, než u 43% propustnosti u vzorku B a 27% propustnosti u armádní bundy.

2.3.3 Odolnost proti pronikání bojových chemických látek

Vzorky byly zaslány do Státního ústavu jaderné, chemické a biologické obrany v Brně, kde jsou testovány na odolnost proti pronikání bojových chemických látek a jejich netoxickým náhradám. Hodnocení odolnosti vzorků se řídí normou ČSN EN 16523-1 (2015) a ČSN EN 16523-2 (2015), výsledky budou prezentovány při obhajobě diplomové práce.

3 Výsledky a diskuze

Naleptání a následné nanesení prášku byl poměrně efektivní postup. Nanovlákná byla naleptáním dostatečně povrchově upravena a nanesení prášku sítím zajistilo homogenní vrstvy prášku. Na snímcích ze SEM je vidět, že i po záměrném odstraňování částic vlivem dynamického prostředí mají vzorky částice rovnoměrně rozmístěné. Částice ulpívají na celé délce vláken v horních vrstvách nanovláknenných vrstev.

Nanovlákná v závislosti na čase naleptávaná působícími etanolovými parami, při působení po dobu delší pěti minut, už byla deformována, to by vedlo postupně k tvorbě vrstvy jednolitého fóliového charakteru. Nanovlákná také vlivem naleptávání a následného deformování měla tendenci se smršťovat a vzorky se začínaly od okrajů kroutit. Pro potlačení tohoto efektu bylo využito kovové síto a závaží. Závaží zapůsobilo proti kroucení na úkor navýšení úkonů potřebných pro manipulaci s jednotlivými vzorky. Vzhledem ke krátkým časovým úsekům, které jsou vhodné pro ideální reakci naleptaných vláken, se postup začal jevit komplikovaným. Exikátor musel být ihned po vyndání/nandání vzorku uzavřen, aby páry etanolu neunikaly zbytečně do okolního prostředí a neprodužovaly následně proces naleptávání o čas potřebný k prostoupení nádoby exikátoru parami. Rozdíly při zkušebních postupech se projeví už v čase prvotního rozptýlení par. Postup je vhodný pro malé rozměry vzorků, pro větší vzorky by musel být poupraven. Technika byla vyhodnocena jako nevyhovující.

Disperze v kombinaci s nanesením prášku je použitelná pro větší formáty vzorků díky aplikaci disperze prostřednictvím rozprašovače a také tento postup není určovaný závislostí rozpouštědla na daném polymeru.

Postřik při poměru disperze 3:1 nebyl dostatečně homogenní. V závislosti na hrubém rozprašování se tvořila fixační místa pro částice jílu jen na těchto místech. Aplikací práškového materiálu na disperzi vlivem koagulace při sušení dochází ke shlukům částic a snížení měrného povrchu částic. Nanášení prášku manuálně sítím docílilo rovnoměrné vrstvy, oproti nanášení prosíváním přes síta za pomoci vibrační přístroje na frakcionaci. Vlivem vibrační měly částice tendenci se shlukovat více, než při nepravidelném pohybu manuálního nanášení.

Výrazně lepších výsledků bylo dosaženo disperzí v poměru 10:1. Částice oxidu ceričitého byly rovnoměrně rozprostřené v homogenní tenké vrstvě. Vlivem nanášení částic sypaním částice ulpívaly i na samotných vláknech, což nakonec vedlo k samostatnému postupu.

Samotné nanesení prášku. Ze snímků SEM je patrné zachytávání částic na nanovláknou vrstvu, jejich rovnoměrné rozložení v délce vláken po celé ploše textilie a úzká distribuce velikosti částic.

Disperze s obsahem prášku byla podobně jako disperze s následným nanesením prášku negativně ovlivněna koagulací disperze. Trysky rozprašovače se ucpávaly vlivem hromadění částic jílu a zasychání disperze. Nános na textilií byl závislý právě na rovnoměrnosti postřiku, které se nepodařilo docílit při poměru disperze 3:1. Poměr 10:1 s částicemi oxidu ceričitého vytvořily homogenní vrstvu.

Velkou výhodou tohoto postupu bylo, že prášek byl součástí disperze, čímž nedocházelo při vrstvení na textilií k prášení částic do okolního prostředí. Na tomto základě byl postaven i další postup.

Zvlákňování z roztoku s obsahem prášku zahrnovalo částice už v polymerním roztoku, ze kterého byly následně nanovlákněné vrstvy vyráběny. Limitujícím parametrem u postupu je maximální možné množství prášku v objemu roztoku, kdy ještě dochází ke zvlákňování. Maximální možné množství prášku v objemu roztoku se může lišit v závislosti na zvoleném polymeru, jeho koncentraci v roztoku a dalších parametrech zvlákňování. Větší podíl částic oxidu kovu (TiO_2) v roztoku polymeru (okolo 3 hm. %, viz (Nkabinde, 2020)) vytvoří koncentrovanější roztok. Vysoká viskozita brání tvorbě nanovláken a rychlost toku polymerního roztoku kapilárou je obtížně řízena. Částice mohou mít vliv na průměr vláken. Začlenění částic oxidu kovu do roztoku zvýší vodivost roztoku, který má být elektrostaticky zvlákňován. Vyšší vodivost a hustota náboje vede k protažení paprsku a výsledkem jsou rovnoměrnější vlákna s menšími průměry než u zvlákňování z roztoku bez obsahu částic oxidu kovu (Nkabinde, 2020). Ze snímků z elektronového mikroskopu je patrný nižší obsah částic v ploše textilie, naopak je možné prostoupení částic do vrstev v celém objemu textilie, díky přítomnosti částic v polymerním materiálu přímo ve fázi tvorby vláken.

Zvlákňování s průběžným nanášením prášku bylo zvoleno pro tvorbu výsledných vzorků, díky možnosti výběru polymeru i částic, vrstvení částic v objemu textilie mezi nanovláknými vrstvami, výroby rozměrnějších plošných útvarů v řádech decimetrů, efektivnosti nanášení prášku v ohledu na rovnoměrnost nánosů po celé ploše vlákné vrstvy, úsporném a šetrném využití částic, které se při nanášení přímo ve zvlákňovací komoře nerozptylují do okolního prostředí v nadměrné míře. Vyrobené nanovlákné vrstvy s práškem se s podkladovou spunbondovou textilií poměrně snadno sejmou z kolektoru a při následném příčném přeložení vytvoří výslednou podobu, potřebnou pouze po okrajích pojit. Pojení bylo docíleno ultrazvukově. Místem pro optimalizaci by bylo především nanášení prášku, pro využitelnost i ve větších objemech výroby a s menším prášením do okolí.

Zvlákňovací zařízení bylo potřeba dobře odizolovat, aby nedocházelo k probíjení vlivem použitých částic. Zvlákňování polyamidu v závislosti na dodatečném přidávání kyseliny sírové může vést k nerovnoměrnosti vláken a vlákných vrstev. Nanášením prášku přímo ve zvlákňovací komoře se částice dostávají i na zvlákňovací pumpu a následně i do polymerního roztoku, čímž mohou být ovlivněny podmínky zvlákňování. Menší množství částic TiO_2 může zvýšit vodivost roztoku a snížit průměr vláken. Vzorky polyvinylbutyralu s nanášenými částicemi MOFs byly vyráběny zvlákňováním z pumpy mimo zvlákňovací komoru. Mohlo tedy docházet k nanášení prášku souběžně se zvlákňováním. Proudění vzduchu okolo rychle rotujícího válečku snímajícího vláknou vlekku vířily nanášený prášek, který se rozletoval do prostoru laboratoře. Snímky ze SEM ukázaly velmi nízký obsah částic ve vlákných vrstvách. Částice byly rozprostřeny do celého objemu textilie, celkový podíl byl ovšem tak malý, že postup není možné uznat jako vhodný.

Další směřování řešení problematiky nanášení nanočástic na nanovlákné materiály pro dekontaminaci bojových chemických látek by se mělo ubírat ke zkoumání závislosti podílu částic oxidů kovů v polymerním roztoku při elektrostatickém zvlákňování a vliv zakomponovaných částic do polymerního materiálu na výsledné schopnosti rozkládat bojové chemické látky.

Závěr

Odborná literatura byla nastudována a zpracována do rešeršní a teoretické části, ze kterých vychází praktická část této diplomové práce. Vzorky byly připraveny šesti různými výrobními metodami, využívající způsob elektrostatického zvlákňování. Nanovláknenné vrstvy s přídavkem částic oxidu ceričitého a titaničitého byly úspěšně vyrobeny. Testování odolnosti proti bojovým chemickým látkám probíhá ve Státním ústavu jaderné, chemické a biologické ochrany (SÚJCHBO) v Brně. Zkušební testování odolnosti proti simulantům bojových chemických látek proběhlo u prvotních vzorků, které v testování obstály všechny srovnatelně. Morfologická analýza pomocí snímků z elektronového mikroskopu umožnila porovnání jednotlivých metod nanášení prášků na vláknenné vrstvy a poskytla informace o velikosti, tvaru a distribuci daných částic. Prodyšnost a paropropustnost vzorků s vrstvami s oxidem titaničítým, aktivním uhlím, spunbondovými mezivrstvami a vrchní tkaninou, které patří k výslednému ochrannému oděvu, vykázaly lepší hodnoty než současně využívaný armádní oděv typu FOP-96, jak bylo požadováno. Vyrobeny byly navíc také vzorky s částicemi MOFs. Diskutována byla možná místa optimalizace a návrhy dalšího směřování řešení problematiky. Všechny stanovené cíle diplomové práce byly splněny.

Použitá literatura

- Alghoraibi, I., Alomari, S. 2018.** Different Methods for Nanofiber Design and Fabrication. *Handbook of Nanofibers*. Springer, Cham. 2018, ISSN 978-3-319-42789-8. DOI https://doi.org/10.1007/978-3-319-42789-8_11-2.
- Almetwally, A. A., El-Sakhawy, M., Elshakankery, M. H., Kasem, M. H. 2017.** Technology of nano-fibers: Production techniques and properties-Critical review. *Journal of the Textile Association*. 2017, 78 (1). 5-14.
- Brown, P. J., Stevens, K. 2007.** *Nanofibers and nanotechnology in textiles*. Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2007. ISBN 978-1-8459-105-9.
- Čapoun, T., & Krykorková, J. 2012.** Dekontaminace bojových chemických látek za nízkých teplot v HZS ČR I: teoretická východiska. *The Science for Population Protection*. 2012, 4(4). 5-16. ISSN: 1803-568X.
- Carrot, Ch., Bendaoud, A., Pillon, C. 2015.** Polyvinyl Butyral. [autor knihy] Kolapo A. Olagoke O. *Handbook of Thermoplastics*. London : CRC Press. 89-137. DOI 10.1201/b19190-4, 2015.
- ČSN EN 16523-1. 2015.** Stanovení odolnosti materiálu proti permeaci chemikálií - Část 1: Permeace plynné chemikálie v podmínkách trvalého kontaktu. Praha : Český normalizační institut, 2015.
- ČSN EN ISO 11092. 2015.** Textilie - Fyziologické účinky - Měření tepelného odporu a výparného odporu za stálých podmínek (zkouška pomocí vyhřívané desky simulující efekt pocení). Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- ČSN EN ISO 9237. 1996.** Textilie - Zjišťování prodyšnosti plošných textilií. Praha : Český normalizační institut, 1996.
- Das, D., Pourdeyhimi, B. 2014.** *Composite Nonwoven Materials. Structure, Properties and Applications*. Cambridge, Waltham, Kidlington : Woodhead Publishing Series in Textiles, 2014. 155. ISBN 978-0-85709-770-5.
- Elmarco.** Technologie NanospiderTM. *Elmarco*. [Online] [Citace: 22. 12 2020.] <https://www.elmarco.cz/ns-technologie>.
- Filipová, Z., Kukutschová, J., Mašláň, M. 2012.** *Rizika nanomateriálů*. Olomouc : Univerzita Palackého v Olomouci. Katedra experimentální fyziky, 2012. ISBN 978-80-244-3201-4.
- Grandcolas, M., Sinault, L., Mosset, F., Louvet, A., Keller, N., Keller, V. 2011.** Self-decontaminating layer-by-layer functionalized textiles based on WO₃-modified titanate nanotubes. Application to the solar photocatalytic removal of chemical warfare agents. *Applied Catalysis A: General*. 2011, 391 (1-2). 455-467. ISSN 0926860X, DOI 10.1016/j.apcata.2010.05.028.
- Gugliuzza, A., Drioli, E. 2013.** A review on membrane engineering for innovation in wearable fabrics and protective textiles. *Journal of Membrane Science*. 2013, 446. 350-375. ISSN 03767388. DOI 10.1016/j.memsci.2013.07.014.

- Hes, L., Sluka, P. 2005.** *Úvod do komfortu textilií*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2005. ISBN 80-7083-926-0.
- Hochmannová, L., Vytřasová, J. 2010.** Vliv nanočástic TiO₂ a ZnO na fotokatalytické a antimikrobiální účinky silikátových nátěrů. *Chem. listy*. 2010, 104. 940-944.
- Holišová, V. 2014.** *Hydrolyza bojových látek s využitím biosyntetizovaných zlatých nanočástic*. Ostrava : Diplomová práce. Technická univerzita Ostrava. Centrum nanotechnologií. Vedoucí práce Gabriela Kratošová, 2014.
- Horrocks, A. R., Anand, S. C. 2000.** *Handbook of Technical Textiles*. Cambridge : Woodhead Publishing Limited. The Textile Institute., 2000. ISBN 1 85573 385 4.
- Jirsák, O., Kalinová, K. 2003.** *Netkané textilie*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2003. ISBN 80-708-3746-2.
- Karthik, T., Prabha Karan, C., Rathinamoorthy, R. 2016.** *Non-woven – Process, Structure, Properties, and Applications*. New Delhi : Woodhead Publishing India PVT LTD, 2016. ISBN 978-93-85059-12-4.
- Kellie, G. 2016.** *Advances in Technical Nonwovens*. Duxford, Cambridge, Kidlington : Woodhead Publishing Series in Textiles, 2016. 181. ISBN 978-0-08-100575-0.
- Khan, A., Abu-Zied, B. M., Hussein, M.A., Asiri, A. M., Azam, M. 2019.** *Metal-Organic Framework Composites. Volume 1*. Millersville : Materials Research Forum LLC, 2019. ISBN 978-1-64490-028-4.
- Khan, S. B., Faisal, M. , Rahman, M. M., Akhtar, K., Asiri, A. M., Khan, A., Alamry, K. A. 2013.** Effect of Particle Size on the Photocatalytic Activity and Sensing Properties of CeO₂ Nanoparticles. *International Journal of Electrochemical Science*. 2013, 8. 7284 - 7297.
- Kim, Y. K. 2019.** Nanotechnology-based advanced coatings and functional finishes for textiles. *Smart Textile Coatings and Laminates*. 189-203 : ISBN 9780081024287. DOI 10.1016/B978-0-08-102428-7.00009-2, 2019.
- Kolektiv. 2012.** *Chemická služba. Učební skripta*. Praha : Ministerstvo vnitra - generální ředitelství Hasičského záchranného sboru ČR, 2012.
- Lukáš, D., Sarkar, A., Martinová, L., Vodsed'álková, K., Lubasová, D., Chaloupek, J., Pokorný, P., Mikeš, P., Chvojka, J., Komárek, M. 2006.** Physical principles of electrospinning (Electrospinning as a nano-scale technology of the twenty-first century). *Textile Progress*. 2006, 38(4).
- MacGillivray, L.R. 2010.** *Metal-Organic Frameworks. Design and Application*. New Jersey : John Wiley and Sons, Inc., 2010. ISBN 978-0-470-19556-7.
- Masařík, D. 2015.** *Komfortní vlastnosti vojenských filtračních ochranných převleků*. Liberec : Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Luboš Hes, 2015.
- Mikeš, P., Lukáš, D. 2015.** *Fyzikální principy tvorby nanovláken*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2015.
- Militký, J. 2002.** *Technické textilie. Skriptum*. Liberec : Technická univerzity v Liberci, 2002.

- Mittal, M., Gupta, A., Pandey, O. P. 2018.** Role of oxygen vacancies in Ag/Au doped CeO₂ nanoparticles for fast photocatalysis. *Solar Energy*. 2018, 165. 206-216. ISSN 0038092X. DOI 10.1016/j.solener.2018.03.033.
- Mojžíšková, N. 2018.** *Využití modifikovaného vermikulitu pro sorpci simulantů bojových chemických látek*. Ostrava : Bakalářská práce. Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava. NANotechnologie. Vedoucí práce Daniela Plachá., 2018.
- Moráček, J. 2017.** *Prostředky individuální ochrany jednotlivce*. Zlín : Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati. Vedoucí práce Ivan Mašek, 2017.
- Nechvilová, K. 2012.** *Oxid křemičitý – vlastnosti a použití tzv. "bílých sazí" a dalších sloučenin křemíku*. Pardubice : Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Andréa Kalendová, 2012.
- Nirmala, R., Navamathavan, R., Soo-Jin Park, Hak Yong Kim. 2014.** Recent Progress on the Fabrication of Ultrafine Polyamide-6 Based Nanofibers Via Electrospinning: A Topical Review. *Nano-Micro Letters*. 2014, 6(2). 89-107. <http://dx.doi.org/10.5101/nml.v6i2.p89-107>.
- Nkabinde, S.C., Moloto, M. J., Matabola, K. P. 2020.** Optimized Loading of TiO₂ Nanoparticles into Electrospun Polyacrylonitrile and Cellulose Acetate Polymer Fibers. *Journal of Nanomaterials*. 2020, 2020. ISSN 16874129. DOI 10.1155/2020/9429421.
- Norma ČSN EN 16523-2. 2015.** . *Stanovení odolnosti materiálu proti permeaci chemikálií - Část 2: Permeace plynné chemikálie v podmínkách trvalého kontaktu*. Praha : Český normalizační institut, 2015.
- Plastic Technology. 2020.** Polyvinyl Butyral Films. *Polymer Properties Database*. [Online] 2020. [Citace: 10. 10 2020.] <http://polymerdatabase.com/Films/PVB%20Films.html>.
- Pořáková, L. 2013.** *Vývoj metody úpravy vláknenných filtrů pomocí oxidů kovů*. Liberec : Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Textilní a materiálové inženýrství. Vedoucí práce Jakub Hruža, 2013.
- Radetić, M. 2013.** Functionalization of textile materials with TiO₂ nanoparticles. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*. 2013, 16. 62-76. ISSN 13895567. DOI 10.1016/j.jphotochemrev.2013.04.002.
- Rakap, M., Kalu, E., Özkar, S. 2011.** Polymer-immobilized palladium supported on TiO₂ (Pd-PVB-TiO₂) as highly active and reusable catalyst for hydrogen generation from the hydrolysis of unstirred ammonia-borane solution. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011, 36(2). 1448-1455. ISSN 03603199. DOI 10.1016/j.ijhydene.2010.10.097.
- Sakarkar, S., Muthukumaran, S., Jegatheesan, V. 2020.** Evaluation of polyvinyl alcohol (PVA) loading in the PVA/titanium dioxide (TiO₂) thin film coating on polyvinylidene fluoride (PVDF) membrane for the removal of textile dyes. *Chemosphere*. 2020, 257. ISSN 18791298. DOI 10.1016/j.chemosphere.2020.127144.
- Senić, Ž., Bauk, S., Vitorović-Todorović, M., Pajić, N., Samolov, A., Rajić, D. 2011.** Application of TiO₂ Nanoparticles for Obtaining Self-Decontaminating Smart Textiles. *Scientific Technical Review*. 2011, 61 (3-4). 63-72. UDK: 614.835:677.051.187.526.5:622.767. COSATI: 07-04, 07-02, 11-05 .

Slabotinský, J. 2006. Mechanismus pronikání toxických látek ochrannými materiály. *Spektrum*. Příbram : Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany, 2006. 6 (2). 12-15. ISSN 1211-6920.

Ulman, I. 2019. *Kombinace známých vlákných technik pro vytvoření vhodného nosného materiálu pro sorbenty*. Liberec : Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Fakulta textilní. Textilní inženýrství. Netkané a nanovláknenné materiály. Vedoucí práce Radek Jirkovec, 2019.

Vaněk, J. 2019. *Použití nanočástic oxidů kovů pro účinnou dekontaminaci škodlivých látek*. Příbram : Rešerše, 2019.

Vaněk, J., Brabencová, E., Slabotinský, J. 2016. Použití simulantů bojových chemických látek pro stanovení ochranné účinnosti bariérových materiálů. *Hazmat Protect*. Milín : Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany, 2016.

Vobecká, K. 2015. *Využití nanotechnologií v ochraně před účinky toxických látek*. Kladno : Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta biomedicínského inženýrství. Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva. Vedoucí práce Vladimír Pitschmann, 2015.

Yuranova, T., Mosteo, R., Bandara, J., Laub, D., Kiwi, J. 2006. Self-cleaning cotton textiles surfaces modified by photoactive SiO₂/TiO₂ coating. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. 2006, 244 (1-2). 160-167. ISSN 13811169. DOI 10.1016/j.molcata.2005.08.059.

Zimová, M. 2011. *Hodnocení ochranných vlastností profesních oděvů*. Liberec : Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Zuzana Fléglová, 2011.

Seznam obrázků

Obrázek 1 Nanovlákná vrstva na papírové utěrce (a); Exikátor s přidavným stojanem (b); Nanovlákná vrstva se sítím a závažím (c)	39
Obrázek 2 Nanovlákná vrstva s jílem (a); Příklad na frakcionaci (b)	40
Obrázek 3 Naleptávané nanovlákné vrstvy s jílem, zvětšení 2500 x, nanosení prášku po naleptání (a), nanosení prášku před naleptáním (b).....	43
Obrázek 4 Nanovlákné vrstvy s oxidem kovu rozptýleným v disperzi, zvětšení 1000 x, oxid ceričitý forma 1 (a), oxid ceričitý forma 2 (b).....	45
Obrázek 5 Nanovlákné vrstvy s oxidy kovu ze zvláknování z tyčky, zvětšení 2000 x, oxid ceričitý forma 1 (a), oxid ceričitý forma 2 (b).....	46
Obrázek 6 Nanovlákné vrstvy s nanoseným oxidem titaničitým, zvětšení 5000 x	46
Obrázek 7 Nanovlákné vrstvy s nanoseným práškem, (měřítko 100 μm), jílu (a), zvětšení 500 x, oxidu titaničitého (b), zvětšení 1000 x	47
Obrázek 8 Nanovlákné vrstvy s nanoseným oxidem kovu, zvětšení 1000 x, oxid ceričitý forma 1 (a), oxid ceričitý forma 2 (b)	47
Obrázek 9 Nanovlákné vrstvy s MOFs, zvětšení 1000 x (a)(b), 2000 x (c)(d), MOFs forma 1 (a)(c), MOFs forma 2 (b)(d).....	48
Obrázek 10 Grafické zobrazení velikostí částic pomocí krabicového grafu.....	50

Seznam tabulek

Tabulka 1 Vypočtené základní statistické hodnoty naměřených dat velikosti částic.....	50
Tabulka 2 Naměřené hodnoty prodyšnosti vzorků A a B, vypočtené statistické hodnoty.....	51
Tabulka 3 Naměřené hodnoty paropropustnosti vzorků A a B, vypočtené statistické hodnoty...	52