



Bakalářská práce

Příprava a charakterizace kompozitních nanovláknenných membrán s TiO₂ částicemi

Studijní program:

B0723A270001 Textilní technologie, materiály a nanomateriály

Autor práce:

Antonín Kodytek

Vedoucí práce:

Ing. Radek Jirkovec, Ph.D.

Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů

Liberec 2024



Zadání bakalářské práce

Příprava a charakterizace kompozitních nanovláknenných membrán s TiO₂ částicemi

Jméno a příjmení:

Antonín Kodytek

Osobní číslo:

T20000217

Studijní program:

B0723A270001 Textilní technologie, materiály a nanomateriály

Zadávací katedra:

Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů

Akademický rok:

2023/2024

Zásady pro vypracování:

- 1) Vypracování literární rešerše na dané téma
- 2) Příprava a charakterizace polymerních roztoků
- 3) Příprava a charakterizace nanovláknenných membrán
- 4) Zpracování výsledků a závěr

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: 40-60 dle potřeby
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: čeština

Seznam odborné literatury:

- 1) Afshari, M. Electrospun Nanofibers. Woodhead Publishing. 2017. 648 s. ISBN 978-0-08-100907-9.
- 2) Parrino, F., Palmisano, L. Titanium Dioxide (TiO₂) and Its Applications. Woodhead Publishing. 2021. 730 s. ISBN 978-0-12-819960-2.
- 3) Lou, L., Osemwegie, O., Ramkumar, S. S. Functional Nanofibers and Their Applications. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, vol. 59, DOI: 10.1021/acs.iecr.9b07066.

Vedoucí práce: Ing. Radek Jirkovec, Ph.D.
Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů

Datum zadání práce: 6. května 2024
Předpokládaný termín odevzdání: 10. ledna 2025

doc. Ing. Vladimír Bajzík, Ph.D.
děkan

L.S.

doc. Ing. Pavel Pokorný, Ph.D.
garant studijního programu

V Liberci dne 6. května 2024

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

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

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom 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 bakalářská 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 vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Poděkování

Rád bych vyjádřil svou hlubokou vděčnost panu Ing. Janu Klusovi, Ph.D., vedoucímu mé bakalářské práce, za jeho vstřícný přístup a podporu po celou dobu zpracování mé práce. Jeho cenné rady a odborné konzultace pro mě byly neocenitelným zdrojem inspirace a vedení. Zvláště bych chtěl ocenit jeho ochotu a čas, který věnoval pomoci s laboratorními pracemi, což mě výrazně posunulo v mém výzkumu.

Velké poděkování patří také mé rodině, která mě neustále podporovala během celého mého studia a byla mi oporou v každém kroku této cesty.

Anotace

Tato práce pojednává o přípravě a charakterizaci nanovláknenných membrán TiO_2 částicemi, konkrétně se jedná o zvlákňování polyamidu a přidání částic TiO_2 s důrazem na určení UV faktorů. Práce začíná popisem elektrostatického zvlákňování a jeho principů. Poté jsou definovány nanomateriály a kompozity, které jsou následně využity pro výrobu membránového materiálu z polyamidových vláken, jež jsou dále zvlákňovány. Pro zlepšení UV ochranných vlastností membrán jsou do polyamidové matrice přidány částice oxidu titaničitého.

V další části je kladen důraz na charakterizaci výsledných membránových materiálů. K detailnímu zkoumání morfologie a struktury membrán jsou použity analytické metody, například elektronová mikroskopie. Spektrofotometrická měření jsou prováděna pro určení optických vlastností, zejména UV faktorů, což je klíčový aspekt pro filtraci UV záření.

Výsledky výzkumu zdůrazňují výhody spojené s přidáním částic TiO_2 do polyamidových membrán, což může vést ke zvýšené odolnosti vůči UV záření a zároveň udržovat vysokou propustnost pro žádoucí látky. Získané poznatky mají potenciál posunout technologii membránových materiálů směrem k efektivnějším a odolnějším systémům pro různé aplikace, například ve filtračním průmyslu vody a vzduchu.

Klíčová slova

Nanovláknna, polyamid 6, kompozitní materiály, bezjehlové elektrostatické zvlákňování, UV faktor

Annotation

This work focuses on the preparation and characterization of nanofibrous membranes with TiO₂ particles, specifically involving the electrospinning of polyamide and the addition of TiO₂ particles, with an emphasis on determining UV factors. The work begins with a description of electrostatic spinning and its principles. Subsequently, nanomaterials and composites are defined, which are then utilized for the production of membrane materials from polyamide fibers, subsequently electrospun. To enhance the membrane properties, particles are added to the polyamide matrix.

The next section focuses on the characterization of the resulting membrane materials. Analytical methods such as electron microscopy are employed to examine the morphology and structure of membranes in detail. Spectrophotometric measurements are conducted to determine optical properties, especially UV factors, a crucial aspect for filtering UV radiation.

The research highlights the advantages associated with adding TiO₂ particles to polyamide membranes, which can lead to improved resistance to UV radiation while maintaining high permeability for desired substances. The insights gained have the potential to advance membrane technology towards more efficient and resilient systems for various applications, such as in water, air, and filtration industries.

Keywords

Nanofibers, Polyamid 6, composite materials, needleless electrostatic spinning, UV factor of nanofibers, conductivity and viscosity of nanofibers

Obsah

ÚVOD	10
1. TEORETICKÁ ČÁST	11
1.1 Nanotechnologie a nanovlákná	11
1.2 Elektrostatické zvlákňování	12
1.2.1 Popis elektrostatického zvlákňování	12
1.2.2 Princip elektrostatického zvlákňování	13
1.3. Elektrorozprašování a elektrostatické zvlákňování kapilární metodou	14
1.3.1 Bezjehlové elektrostatické zvlákňování Nanospider	16
1.4 Kolektory používané při elektrostatickém zvlákňování	17
1.4.1 Geometrie kolektoru.....	17
1.4.2 Materiálové typy kolektoru	18
1.5 Polymery	19
1.5.1 Syntéza polymerů.....	19
1.5.2 Polyamid 6	20
1.6. Morfologie nanovláknenných materiálů	21
1.7. Oxid titaničitý	22
1.8 Fyzikální vlastnosti	23
1.8.1 Měření kontaktního úhlu	23
1.8.2 Viskozita	24
1.8.3 Mikroskopie	25
1.8.4 Ochranný faktor, transmitance a absorbance UV záření.....	26
1.9 Nanokompozitní materiály.....	27
1.9.1 Polymerní nanokompozitní materiály	28
1.9.2 Použití nanokompozitních materiálů	28

2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	30
2.1 Příprava polymerních roztoků	31
2.2 Měření viskozity	31
2.3 Měření vodivosti	32
2.4 Bezjehlové zvlákňování polyamidu B27	33
2.6 Elementární analýza	36
2.7 Měření kontaktního úhlu	38
2.8 Měření ochranného faktoru, transmittance a absorpance UV záření	40
ZÁVĚR	43
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	45

Seznam symbolů, zkratek, rovnic, obrázků a tabulek

Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
UV	nm	Ultrafialové záření
P	Pa	Tlak
σ	C/m ²	Povrchový náboj
R	Mol/K	Plynová konstanta
e	C/m ²	Elementární náboj
$\log P_v/P_0$		Logaritmus podílu tlaku nasycené páry
k	J/K	Boltzmannova konstanta
T	K	Teplota
R _Ω	Ω	Elektrický odpor
η	Pa·s	Dynamická viskozita
\bar{M}_v	Kg/mol	Střední mol. hmotnost
K		Konstanta
E ₀		Permitivita vakua

Seznam zkratek

Zkratka	Význam
UV	Ultrafialové spektrum / záření
STEM	Skenovací elektronová mikroskopie
TEM	Transmisní elektronová mikroskopie
UPF	UV ochranný faktor
TT	Transmitance
AA	Absorbance
PA6	Polyamid 6
CHNS	Spálení vzorku (organického a mnohých anorganických) pevného i kapalného v proudu kyslíku za vysokých teplot

Seznam rovnic

Rovnice 1 – Laplaceův zákon popis tlakových rozdílů v kapalinách [1]	10
Rovnice 2 – Clausius-Clapeyronovu rovnice [2]	11
Rovnice 3 – Huggisova rovnice [3]	23
Rovnice 4 – Fox-Floryho rovnice [4]	23
Rovnice 5 – Mark-Houwink-Sakuradaův vztah [5]	24

Seznam obrázků

Obrázek 3 – Obecné schéma elektrostatického zvlákňování z trysky [1]	11
Obrázek 2 – Schéma elektrostatického zvlákňování z trysky [2]	13
Obrázek 3 – Způsoby průtoku kapaliny přes kapiláry při elektrostatického zvlákňování [3]	14
Obrázek 4 – Laboratorní zařízení pro elektrostatické zvlákňování Nanospider [4]	15
Obrázek 5 – Varianty kolektoru pro elektrostatické zvlákňování [5]	16
Obrázek 6 – Obecný vzorec polyamidu [6]	19
Obrázek 7 – Schéma pro měření kontaktního úhlu [7]	22
Obrázek 8 – Princip Skenovací transmisní elektronová mikroskopie [8]	25
Obrázek 9 – Princip výroby nanokompozitních materiálů [9]	27
Obrázek 10 – Vliv závislosti viskozity na hmotnostním podílu TiO ₂ v roztoku polyamidu [10]	38
Obrázek 11 – Vliv závislosti vodivosti na hmotnostním podílu TiO ₂ v roztoku polyamidu [11]	31
Obrázek 12 – Snímky nanovláken pořízené skenovacím elektronovým mikroskopem při zvětšení 10000x [12]	33
Obrázek 13 – Průměry vláken [13]	34
Obrázek 14 – Vliv závislosti kontaktního úhlu na hmotnostním podílu TiO ₂ v roztoku polyamidu [14]	36
Obrázek 15 – Vliv závislosti povrch. energie na hmotnostním podílu TiO ₂ v roztoku polyamidu [15]	36
Obrázek 16 – Vliv závislosti Transmittance na vlnové délce [16]	37

Seznam tabulek

Tabulka 1 – <i>Parametry zvlákňování [1]</i>	32
Tabulka 2 – <i>Směrodatná odchylka a plošná hmotnost vyrobených nanovláknenných vrstev s TiO₂ částicemi [2]</i>	34
Tabulka3 – <i>Procentuální zastoupení prvků a částic ve vzorku [3]</i>	35
Tabulka 4 – <i>Závislost ochranného faktoru na obsahu TiO₂ ve vzorku Polyamidu 6 [4]</i>	42

ÚVOD

Elektrostatické zvlákňování je inovativní technika v oblasti výroby vláken, která umožňuje vytvářet vlákna s extrémně malým průměrem a vysokou povrchovou plochou. Tato metoda využívá elektrostatické pole k vytvoření tenkých vláken z polymerů či jiných materiálů. S rozvojem této techniky v posledních letech se produkce stále více zaměřuje na výrobu nanovláken a jejich integraci s nanočásticemi pro vytvoření nových materiálů s jedinečnými vlastnostmi a širokým spektrem aplikací.

Rozvoj vědy byl doprovázen zvýšeným zájmem o materiály, které poskytují široké spektrum vlastností žádaných v jednotlivých odvětvích, jako je například pevnost, odolnost, hydrofilita či hydrofobicita, modul pružnosti, elektrická vodivost atd. Existují však jevy, které svým působením na tyto materiály mohou způsobit degradaci těchto vlastností. Degradace způsobená teplem, vlhkostí, chemickými látkami nebo UV zářením může vést k poklesu jejich mechanických vlastností nebo změně povrchových vlastností. Proto je v oblasti ochrany polymerních materiálů vůči různým druhům degradace klíčové hledání účinných a dlouhodobě spolehlivých ochranných prostředků. Tyto ochranné prostředky mohou zahrnovat různé druhy povrchových úprav, přídavných aditiv do polymerních hmot nebo dokonce konstrukční změny ve formě kompozitních materiálů. Studium a vývoj těchto ochranných technologií představuje důležitý krok směrem k vytvoření polymerních materiálů s vysokou životností a odolností vůči různým degradačním mechanismům. Tato práce se zabývá ochranou polymerních vláken vůči působení UV záření a výrobou kompozitního materiálu. S ohledem na rostoucí význam environmentálních a zdravotních otázek vyžaduje značné úsilí, které je vynakládáno na hledání či vývoj účinné ochrany těchto materiálů.

Předmětem této studie je zjistit, zda oxid titaničitý pozitivně ovlivňuje ochranné vlastnosti polyamidu vůči UV záření. Dále se bude posuzovat závislost výše koncentrace oxidu titaničitého na odolnost materiálu proti působení UV záření. Zkoumat se bude rovněž to, jakým způsobem se projevuje zvlákňování polyamidu při zvyšování koncentrace oxidu titaničitého.

V závěru experimentu byly získané výsledky zpracovány a graficky znázorněny.

1. TEORETICKÁ ČÁST

V této části jsou objasněny základní definice a principy procesu elektrostatického zvlákňování. Elektrostatické zvlákňování je signifikantním procesem umožňujícím výrobu nanomateriálů o žádaných rozměrech. Právě vhodné rozměry vláken tvořených nanomateriály sehrávají klíčovou roli při zprostředkování interakce mezi atomy a strukturou polymerních vláken.

Elektrostatické zvlákňování polymerních roztoků přitáhlo velkou pozornost v posledních letech, jelikož jsou produkty vhodné pro aplikace v různých oblastech, jmenovitě tkáňové inženýrství, filtrace, dodávání léků a biologické snímání.

1.1 Nanotechnologie a nanovlákná

Nanočástice byly předmětem zkoumání vědců již od poloviny 20. století. Efektivita jakékoli vědecké práce však narážela na nemožnost správně rozeznat jejich strukturu. První elektronový mikroskop byl patentován v roce 1931 Němcem Ernestem Ruskem. Tento mikroskop byl schopen rozlišit částice o velikosti nanometrů a tím otevřít možnosti nových vlastností a využití ve všech odvětvích průmyslu. Nanotechnologie se zabývá studiem a využitím struktur o velikosti od 1 nanometru do 100 nanometru. Toto je pravděpodobně nejzákladnější definice nanotechnologie, na které se mnoho odborníků v dnešní době shodne. Vědecká předpona „nano“ je zkratkou pro jednu miliardtinu, tedy 10^{-9} . Slovo „nanos“ doslova znamená „trpasličí“. [1]

Dílčím oborem nanotechnologie je i výroba nanovláken. Tato nanovlákná musí splňovat odlišné parametry, než bylo uvedeno výše – průměr vlákna nesmí být vyšší než 1000 nm. Nanovlákná jsou definována jako dvourozměrné nanomateriály s průměry menší než 1 μm a poměr stran (délka/průměr) větší než 100:1. Jsou také pojmenovány jako super jemná, popřípadě ultratenká vlákna. Pokud jsou vlákna v rozmezí 100–1000 nm, označují se také jako submikronová vlákna. Existují různé způsoby výroby, například elektrickým či odstředivým zvlákňováním, bikomponentním zvlákňováním či pomocí extruze. Využití těchto vláken umožňuje dosáhnout vylepšených vlastností v oblastech chemických i fyzikálních. V případě mechanických vlastností však dochází ke zlepšení pouze v rámci kompozitních materiálů. Při využití přírodních vláken nedosáhneme tak vysoké odolnosti vůči teplu jako u nomexu používaného u hasičů nebo pevnosti aramidových vláken v balistických ochránách.[2]

1.2 Elektrostatické zvlákňování

První zařízení pro elektrostatické zvlákňování bylo původně patentováno v roce 1934 Antonem Formhalsem a zahrnovalo zvlákňování acetátu celulózy a ester celulózy z roztoku obsahujícího stejné díly acetonu a alkoholu. Později, v 90. letech 20. století, průkopnická práce Doshiho a Renekera vrátila zájem o elektrostatické zvlákňování jako efektivního způsobu výroby nanovláken pro různé aplikace. Od této doby byla navržena různá experimentální nastavení elektrostatického zvlákňování roztoků polymerů či tavenin převedených do vláken s cílem zlepšit výrobu. [3]

1.2.1 Popis elektrostatického zvlákňování

Použití elektrického náboje k rozptýlení kapalin na malé částice je dlouhodobě známé a bylo rozsáhle studováno již více než sto let. Nicméně při přechodu ke komerčním aplikacím se setkáváme s obtížemi spojenými s fyzikálním omezením průtoku kapaliny, které je třeba překonat, například viskozita kapaliny, povrchové napětí a elektrostatické síly. Toto platí pro elektrorozprašování, při kterém mohou být kapaliny s nízkou viskozitou rozprašovány na kapičky, i pro elektrostatické zvlákňování, kdy jsou viskoelastické kapaliny přeměněny na vlákna mikrometrových a nanometrových rozměrů. [4]

Již dlouho je známo, že aplikace elektrického náboje na kapku kapaliny způsobuje nestabilitu kapaliny, což má za následek deformaci kapky na menší fragmenty. Tento účinek vysvětluje vztah Coulombovy teorie odpuzování podobných nábojů a povrchové napětí. Laplaceův zákon ve fyzice se často používá k popisu tlakových rozdílů v kapalinách, obzvláště v kapalinových kapkách nebo bublinách, viz rovnice 1 níže. [5]

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{R} - \frac{e^2}{32\pi^2\epsilon_0 R^4}$$

Rovnice 4 – Laplaceův zákon, popis tlakových rozdílů v kapalinách [1]

Z tohoto vzorce vyplývá, že pokles tlaku je přímo úměrný povrchovému napětí kapaliny a inverzně úměrný poloměru kapiček. To znamená, že pokles tlaku bude větší u menších kapek, protože poloměr ve jmenovateli zvyšuje efekt. Toto je důležitý faktor v různých situacích, jako je vytváření bublinek či kapilárních jevů, které je nezbytné pro elektrostatické zvlákňování kapilární metodou. [5] Proměnlivý vztah mezi tlakovou ztrátou a poloměrem kapky

má důležité důsledky pro pochopení a předvídání kapek/par pro koexistenci a chování vypařující se nabitě kapky, pro kterou lze tlakovou bilanci vyjádřit, viz rovnice 2. [6]

$$\ln P_v/P_0 = \frac{v}{kT} \Delta P = \frac{v}{kT} \left(\frac{2\sigma}{R} - \frac{e^2}{32\pi^2 \epsilon_0 R^4} \right)$$

Rovnice 2 – Clausius-Clapeyronova rovnice [2]

Taylorův kužel označuje kónický tvar pozorovaný při elektrostatickém zvlákňování, elektrospreji a hydrodynamickém rozprašovacím procesu. Kužel představuje mikroskopický prostorový útvar, který je výslednicí působících sil na vrcholu trysky. Tlaková síla působí směrem ke středu Taylorova kuželu. Tato síla je důsledkem komprese polymerového materiálu, kdy se tenčí a protahuje při průchodu kuželem. Mezi vnějším povrchem Taylorova kuželu a vnitřním povrchem trysky vzniká tlakový rozdíl. Tlak uvnitř kuželu je vyšší než vně, což nutí materiál proudit směrem ven a vytvářet vlákno. Tlakový rozdíl spolu s tlakovou silou způsobuje, že polymerní materiál se pohybuje směrem k úzkému otvoru nebo trysce. Tato síla směřuje ve směru protažení materiálu. V materiálu dochází k vnitřnímu tření a deformacím kvůli změnám rychlosti a tlaku během průchodu Taylorovým kuželem. Toto vede k protažení a zúžení materiálu na vlákno. [7]

Při vyšších koncentracích mikročástic dispergovaných v nanovlákněch nastává nežádoucí jev, který brání procesu zvlákňování. Tento jev naznačuje existenci kritického bodu, kde se změny v mikrostruktuře materiálu negativně projevují na jeho schopnosti být zpracováván tímto způsobem.

1.2.2 Princip elektrostatického zvlákňování

Metoda elektrostatického zvlákňování je proces, při kterém dochází vlivem působení silného elektrického pole na roztok nebo taveninu polymeru k tvorbě velmi jemných vláken. Vzniklá vlákna jsou vlivem pole nanášena na kolektor, viz obrázek č. 1 níže. [8]

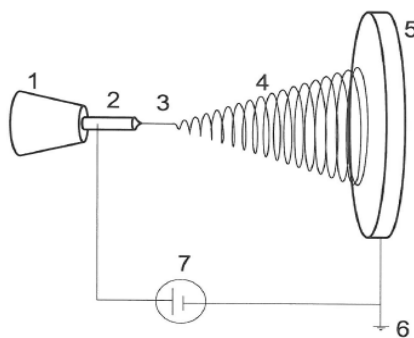


Schéma elektrostatického zvlákňování z trysky: (1) stříkačka napojená na pumpu, (2) jehla/kapilára jako jedna z elektrod, (3) stabilní část trysky, (4) bičující zóna, (5) kolektor, (6) uzemnění, (7) zdroj vysokého napětí.

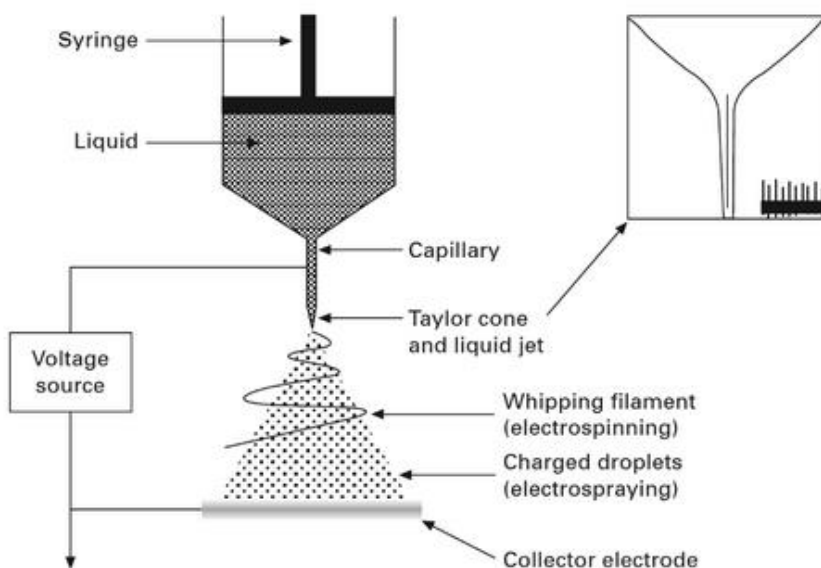
Obrázek 5 – Obecné schéma elektrostatického zvlákňování z trysky [1]

K tvorbě dochází mezi dvěma elektrodami opačného pólu, výjimka nastává při jevu zvaném elektrostatická indukce. Tento jev vzniká vlivem působení elektrických polí na polarizaci molekul v kapalině. Nejprve se připraví polymerní materiál ve formě roztoku nebo taveniny. Tento materiál může být plastický polymer, vláknenný polymer či kombinace různých materiálů podle požadovaných vlastností vláken. Tato připravená tavenina se extruduje nebo stlačuje přes speciální trysku, která je často označována jako elektrostatická tryska. Tryska má malý otvor, který umožňuje vytlačování kapaliny. Jakmile roztok nebo tavenina opustí trysku, je rozprašována do tenkých kapének či vláken. Toho je často dosaženo působením mechanické síly nebo prouděním plynů. Elektrostatický zvlákňovací proces zahrnuje použití elektrostatických sil ke směřování rozprašovaných vláken. [9]

1.3. Elektrorozprašování a elektrostatické zvlákňování kapilární metodou

Elektrostatická nestabilita v kapalinách je využívána především v elektrorozprašování, což představuje nejstarší a stále nejrozšířenější aplikaci této vlastnosti. Elektrorozprašování je často aplikováno na procesy, ve kterých primární rozpad kapaliny není generován elektrostatickými silami, ale vysokým tlakem nebo jinou mechanickou metodou. V tomto případě aplikované elektrické pole slouží především k nabíjení kapiček tak, aby mohly být

efektivně přitahovány k uzemněnému cíli. Tato technologie je lépe popsána jako elektrostaticky asistované stříkání. V běžném uspořádání je vodivá kapalina přiváděna na špičku kovové trysky (kapiláry), která má vysoký negativní, nebo pozitivní potenciál. Jako výsledek generovaného elektrického pole se náboj hromadí na povrchu, visící kapka vytvořená na špičce kapiláry vytváří nestabilitu, která deformuje kapku do tvaru Taylorova kuželu a poté se rozpadá. V tomto režimu provozu mohou vznikat nabitě částice, viz obrázek 2 níže. [10]



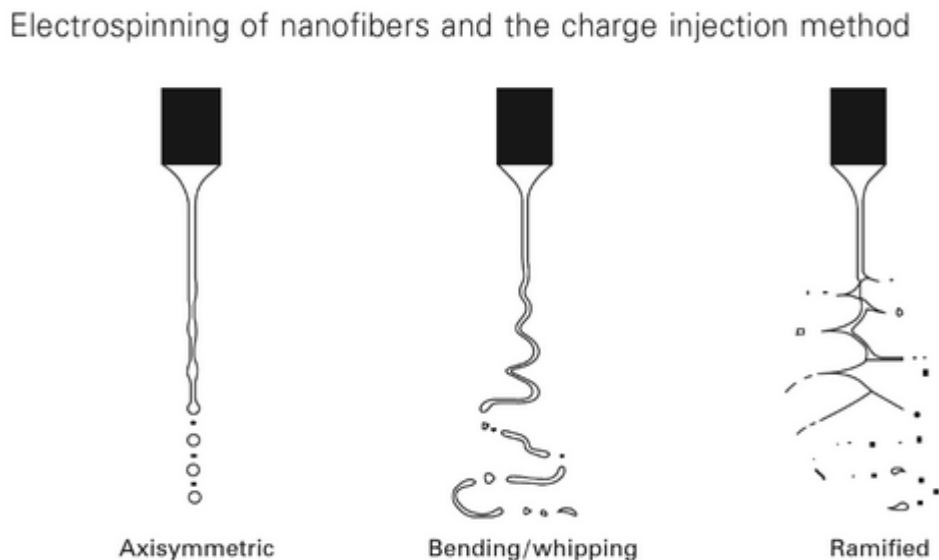
Obrázek 2 – Schéma elektrostatického zvláknování z trysky [2]

Rozbití kapalinové trysky může nastat v důsledku nestability, která má osovou symetrii a souvisí s varikózním jevem. Byl představen model, který je schopen předpovídat velikost kapek. Varikózní nestabilita se vyskytuje, pokud tangenciální síly na povrchu kapaliny (způsobené elektrickým napětím nebo gradientem tlaku) převyšují povrchové napětí. To může vést k rozpadu kapaliny na menší kapičky nebo k vytváření složitých tvarů. Tento jev je klíčový v různých situacích, jako je tvorba emulze nebo kapalných filmů na pevných površích. Bylo zjištěno, že mechanismus rozpadu proudu závisí na poměru elektrického normálového napětí k napětí povrchovému. Počet sekundárních kapiček je podstatně nižší, než počet hlavních kapiček. S rostoucím průtokem se zvyšuje proud, poměr napětí a počet sekundárních kapek. Pro snížení počtu sekundárních kapiček by měl být proud na jehle snížen. [11]

Tento režim může produkovat vysoce monodisperzní průměry kapiček a střední průměry v rozmezí od několika nanometrů do stovek mikrometrů, a to v závislosti na pevnosti

a vlastnostech tekutiny, jako je vodivost a viskozita.

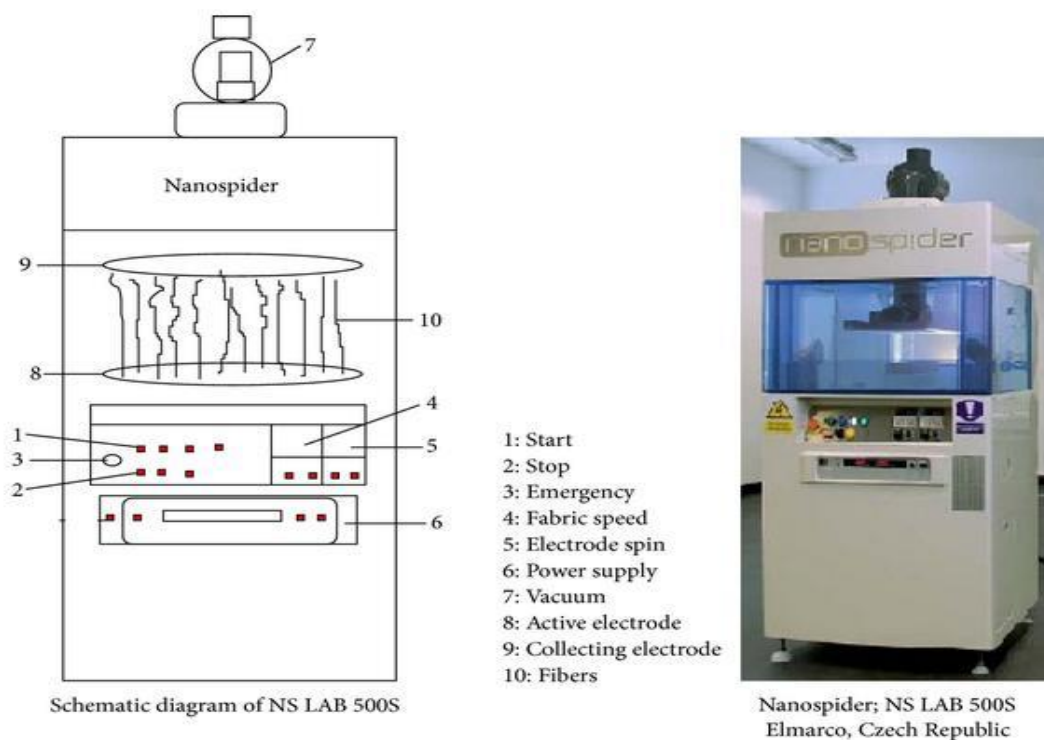
Níže jsou uvedeny příklady možného průběhu, viz obrázek č. 3. [12]



Obrázek 3 – Způsoby průtoku kapaliny přes kapiláry při elektrostatickém zvlákňování z trysky [3]

1.3.1 Bezjehlové elektrostatické zvlákňování Nanospider

Technologie Nanospider reprezentuje unikátní metodu zvlákňování z volné hladiny roztoku polymeru za použití silného elektrostatického pole. Tato technologie umožňuje zvlákňování z celé tenké vrstvy roztoku polymeru a následně výrobu nanovlákných materiálů s vysokou kvalitou v průmyslovém měřítku. Proces využívá zvlákňovací elektrodu ve formě tenké struny a aplikátor pro rovnoměrné pokrytí roztokem polymeru po celé délce struny. Díky intenzivnímu elektrickému poli se na elektrodě tvoří nanovlákná z tenké vrstvy polymeru s vysokou homogenitou, což je klíčové pro mnoho aplikací v oblasti filtrace a biomedicíny. Schéma zařízení Nanospider je uvedeno níže, viz obrázek č. 4. [13]



Obrázek 4 – Laboratorní zařízení pro elektrostatické zvlákňování Nanospider [4]

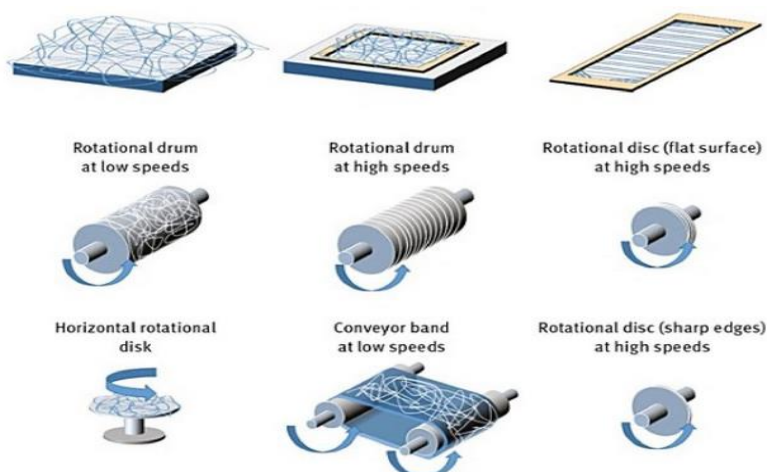
1.4 Kolektory používané při elektrostatickém zvlákňování

Volba kolektorů ovlivňuje vlastnosti finální textilie. Typy a tvary kolektoru mohou být plochý, oválný či diskového tvaru. Mohou být z různých materiálu, ale důležité je, že materiál musí být vodivý. Existují kolektory stacionární či mobilní, které mohou rotovat, případně se jen posouvat. [14]

1.4.1 Geometrie kolektoru

Nejjednodušší a nejpoužívanější kolektor používaný v laboratorním elektrospinningu je stacionární kovová deska nebo fólie umístěná v pevné vzdálenosti od první elektrody. Kónický vzor stříkání, které dopadá na kolektor, má za následek symetrický kruh či oválnou skvrnu nanovláken na povrchu kovu. Protože je kolektor uzemněn, zbytkový náboj na předených vláknech je rychle odstraněn, což umožňuje zachytávat vlákna ke konsolidaci do vrstev s vysokou plošnou hustotou. Různé typy kolektorů používaných při elektrospinningu tvoří

například desky, dále rotační bubny nebo disky. Mohou to být i rotační prstence, ale i pár kuželovitých sběračů. [14, 15] Použití rotujících bubnů nebo pohyblivého pásu umožňuje rovnoměrné ukládání vláken, což má za následek jednotné nanovláknenné vrstvy s řízenou porézností, a také to umožňuje určitý stupeň rychlosti závislé na zarovnání vlákna. Příklady různých způsobů na záchytu vláken na kolektoru jsou uvedeny na obrázku č. 5. [16]



Obrázek 5 – Varianty kolektoru pro elektrostatické zvlákňování [5]

1.4.2 Materiálové typy

Níže jsou uvedeny příklady běžných typů materiálů, ze kterých mohou být vyrobeny kolektory k produkci vláken. Hliníkové kolektory jsou často využity kvůli své lehkosti a dobré elektrické vodivosti. Jsou vhodné pro elektrostatické zvlákňování, jež vyžaduje elektrickou vodivost. Ocelové kolektory jsou odolné a mohou být použity v aplikacích, kde je potřeba mechanická pevnost a odolnost proti opotřebení. Lze využít i sklo při procesech, kde je potřeba nezávadný povrch a odolnost vůči chemikáliím, dále jsou tyto skleněné kolektory hladké, což může být výhodné pro určité aplikace. I některé plastové materiály mohou být používány, pokud jsou povrchově upraveny tak, aby měly vhodné elektrostatické vlastnosti. Pro některé aplikace mohou být použity elektricky vodivé materiály, jako je vodivá guma nebo speciální elektricky vodivé povlaky, aby se zajistilo lepšímu vrstvení vláken. [17]

1.5 Polymery

Polymery jsou makromolekulární chemické sloučeniny, které jsou tvořeny opakujícími se jednotkami nazývanými monomery. Tyto monomery se spojují kovalentními vazbami tvořící dlouhé a řetězovité struktury, které mohou mít velmi rozdílné vlastnosti a formy. Polymer je tedy chemická sloučenina složená z velkého počtu opakujících se jednotek, což může být základní stavební kámen mnoha různých materiálů, včetně plastů, gumy, textilií a biologických makromolekul. [18]

Díky své vysoké molekulové hmotnosti mají polymery ve srovnání s malými molekulami jedinečné vlastnosti, které jsou často obtížně předvídatelné. Proto jsou žádoucí znalosti fyzikálních vlastností polymerů pro práci s polymery a polymerními materiály.

Vlastnosti polymeru, například chování při rozpustnosti, jsou použity jako vodítko v laboratorním měřítku při analýze a charakterizaci polymerů nebo při určování vztahů mezi strukturou a vlastnostmi. V průmyslovém měřítku je důležitá viskozita taveniny nebo tepelná kapacita pro stanovení polymerace. Polymery se často dělí podle toho, zda je lze tavit a přetvářet působením tepla a tlaku. Tyto materiály se nazývají „termoplasty“. Druhá obecná klasifikace patří sloučeninám, jež se rozkládají dříve, než mohou být roztaveny či přetvořeny. Tyto polymery se nazývají „termosety“. Termosetové i termoplastické polymery lze recyklovat, ale termoplasty lze přetvářet jednodušeji působením tepla a tlaku, proto je jejich recyklace jednodušší a rozšířenější. Syntetické polymery jsou často popisovány podle jejich „použití“ a „vzhledu“ jako vlákna, elastomery, plasty, lepidla a povlaky. [19]

Velikost a tvar polymerů úzce souvisí s jejich vlastnostmi. Tvar polymerů je také spojen s velikostí různých jednotek, které tvoří makromolekulu, a různými primárními a sekundárními vazebnými silami, jež jsou přítomny v řetězci a mezi řetězci. U většiny syntetických polymerů může být struktura uvedena jako jedna opakující se jednotka, takže úplnou polymerní strukturu lze získat jednoduchým opakováním opakující se jednotky 100×, 500× nebo 1000× v závislosti na přesném počtu opakujících se jednotek v polymerním řetězci. [20]

1.5.1 Syntéza polymerů

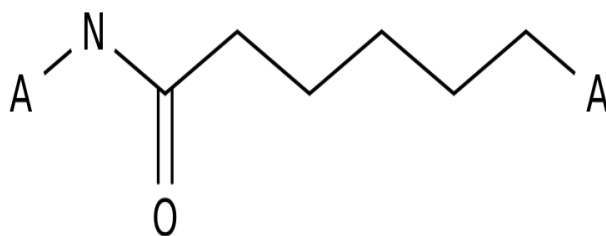
Syntéza polymerů je proces, během něhož se vytváří dlouhé molekulární řetězce (polymery) z opakujících se jednotek zvaných monomery, které jsou spojeny kovalentními vazbami. Tento proces obvykle zahrnuje chemickou reakci, při níž monomery spojují své

struktury tak, že vytváří polymerní řetězce. Syntéza polymerů může být řízena různými faktory, včetně reakčních podmínek, katalyzátorů a výběrem monomerů, což ovlivňuje vlastnosti výsledných polymerů. [21]

Obecně lze polykondenzaci vnímat jako postupné spojování různých funkčních skupin s uvolňováním vody nebo jiných malých molekul. Proto je reaktivita funkčních skupin ve stavebních blocích rozhodující pro konstrukci kondenzačních polymerů. Amidace a esterifikace jsou dva hlavní mechanismy reakci, které jsou často využívány při tvorbě kondenzačních polymerů. Chemické reakce tvořící polymer a reaktivita karbonylové skupiny vůči O, N nukleofilům byla v minulém století dobře prozkoumána a objasněna. Například proces amidace probíhá při teplotách od 180 °C do 200 °C rychle a bez katalyzátorů a obvykle nedochází k vedlejším reakcím, takto lze získávat amidy s vysokou výtěžností. To je velmi důležité pro tvorbu polyamidů s vysokou molekulovou hmotností, protože princip stejné reaktivity všech funkčních skupin během polykondenzací určuje, že ztráta jedné funkční skupiny vedlejšími reakcemi může významně omezit molekulovou hmotnost a výtěžek, kterého lze dosáhnout. Z tohoto pohledu výsledek polykondenzace velmi závisí na reaktivitě funkčních skupin monomerů. [22]

1.5.2 Polyamid 6

Polyamid 6 je jeden z běžnějších typů polyamidů, což jsou polymerní materiály obsahující amidové vazby v jejich molekulové struktuře. Polyamid 6 je charakterizován tím, že má šest atomů uhlíku v molekule mezi dvěma amidovými skupinami.



Obrázek 6 – Obecný vzorec polyamidu: A-značí další články řetězce [6]

PA6 se vyznačuje vysokou pevností a pružností, což z něj činí ideální materiál pro inženýrství a průmyslové aplikace. Má vynikající schopnosti odolávat tahovým a tlakovým silám. Díky své odolnosti proti opotřebení a tření je PA6 často používán pro výrobu součástí, které jsou vystaveny náročným podmínkám, například v průmyslu na součástky podvozku nebo ložiska. Polyamid 6 má dobré tepelné vlastnosti a je schopen odolávat vysokým teplotám, v krátkodobém horizontu jej lze vystavit teplotě od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $110\text{ }^{\circ}\text{C}$, proto jej lze využít tam, kde je vyžadována tepelná stabilita. Bod tání se pohybuje okolo 215–235 stupňů celsia. Obvykle je polyamid 6 odolný vůči olejům, tukům a některým chemikáliím. Naproti tomu neodolává kyselinám, zásadám a sloučeninám chlóru ani oxidačním látkám. [23]

1.6. Morfologie nanovláknenných materiálů

Při elektrostatickém zvlákňování se morfologie nanovláknenných materiálů vytvářených tímto procesem může lišit v závislosti na různých faktorech, jako jsou parametry procesu, použité materiály a okolní podmínky.

Morfologie těchto nanovláken může být ovlivněna intenzitou elektrostatického pole, rychlostí odvádění vláken, teplotou a viskozitou taveniny nebo roztoku. Tyto faktory mohou ovlivnit tloušťku materiálu, délku a tvar nanovláken, což má vliv na jejich vlastnosti a použití. Studium morfologie nanovláken vytvořených elektrostatickým zvlákňováním je důležité pro navrhování materiálů s požadovanými vlastnostmi pro konkrétní aplikace, jako jsou filtry, textilie, elektrotechnika a biomateriály. [24]

Rozpouštědla v roztocích ovlivňují morfologii polymerních vláken. Špatně zvolená rozpouštědla mohou narušit molekulární strukturu polymerních materiálů. Při rozpuštění se polymerní řetězce oddělí a přechází do roztoku, což může způsobit ztrátu polymerní struktury a tvaru materiálu. Některá rozpouštědla mohou způsobit rozpad krystalické struktury a přejít do struktury amorfni. Použití rozpouštědel může vést k vytváření porézní struktury v materiálu. Po odpaření zůstávají mezery nebo póry, což má za následek úbytek plošné hmotnosti nebo propustnosti. [25] U některých vysoce těkavých rozpouštědel je problematické, že rychlé odpaření rozpouštědla ochlazuje vlákno a vlhkost na povrchu vlákna může zmrznout, a to má za následek tvorbu nano či mikropórů na povrchu vlákna. [26]

Použité napětí hraje důležitou roli při formování a ovlivňování morfologie vláken, zejména u materiálů vyráběných technikami jako elektrostatické zvlákňování. Použité napětí ovlivňuje faktory jako průtokovou rychlost, orientace vláken, přesnost tvaru vláken, póry a poróznost a také rychlost tuhnutí. Například změny průtokové rychlosti vedou k tomu, že zvýšené napětí může způsobit rychlejší tah vlákna z roztoku nebo taveniny a dochází ke tvorbě tenčích a delších vláken. Nižší napětí může způsobit větší průměr. Použité napětí je klíčovým parametrem při výrobě vláken a nanovláken, protože umožňuje kontrolu nad jejich morfologií a vlastnostmi. Různé hodnoty napětí mohou být optimalizovány pro konkrétní aplikace. Proces elektrostatického zvlákňování obvykle používá stejnosměrný proud. U střídavého proudu je rizikem jeho nebezpečnost. [27] Ta nastává zejména při vysokých hodnotách napětí, kdy by mohlo docházet k usmrcení po zásahu elektrickým proudem.

1.7. Oxid titaničitý

Průmyslový úspěch TiO_2 spočívá především v jeho jedinečných vlastnostech jako pigmentu. Krycí schopnost oxidu titaničitého vůbec nelze srovnávat s jeho možnými alternativami, protože zdaleka nedosahují jeho kvalit. [28]

Oxid titaničitý se vyskytuje ve třech krystalických modifikacích. Těmi jsou rutil, anatas a brookit. Nejstabilnější z těchto modifikací je za běžných podmínek rutil. Anatas a brookit jsou metastabilní a po zahřátí se přeměňují na rutil. [29]

Dalšími velkými výhodami jsou jeho vysoká odolnost proti korozi, fotokorozi a jedinečné optické vlastnosti. TiO_2 účinně rozptyluje viditelné bílé a infračervené záření a zároveň absorbuje UV světlo. Tedy objekty obsahující TiO_2 vydrží déle při vystavení povětrnostním vlivům, odolávají teplu a světlu, což nakonec vede také k menší produkci odpadu. Jeho použitím se zlepšuje i mechanická stabilita povlaků. [30]

Nanotechnologie umožňuje aplikaci nanočástic TiO_2 na textilní materiály s cílem vyrábět chytré textilie s multifunkčními vlastnostmi, mezi něž patří zvýšená UV ochrana [30], samočisticí schopnost, zvýšená odolnost a antibakteriální vlastnosti. Antibakteriální síla nanočástic oxidu titaničitého je mnohem vyšší než u jiných látek, například stříbro, díky čemuž je pro člověka bezpečnější při používání přímo na kůži. [32, 33] Vlna je nejdůležitější přírodní živočišné vlákno používané v textilním průmyslu, především díky svým vynikajícím vlastnostem. Vlna však vykazuje nízkou fotostabilitu, a to má za důsledek žloutnutí. Tento problém lze vyřešit nanosením vrstvy TiO_2

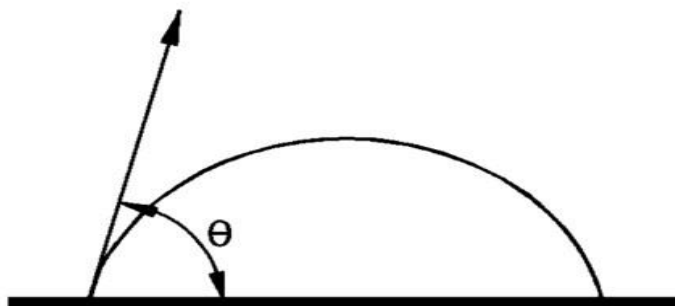
na vlněná vlákna. Jelikož oxid titaničitý může odrážet, rozptylovat nebo absorbovat UV záření, byl TiO₂ testován v několika studiích s cílem vyhodnotit chování anti-UV paprskové úpravy vlny. [34, 35, 36] V těchto studiích vykazaly povrchy takto upravené tkaniny výjimečnou odolnost proti UV záření. U syntetických vláken existuje důležitý parametr, který poskytuje informace o odraženém světle, zvaný „shine“. Tento parametr je závislý na koncentraci TiO₂ v materiálu. [37] Dalším základním aspektem souvisejícím s produkty ze syntetických vláken je vznik statické elektřiny třením, což může způsobit poškození kůže. Tento problém lze také řešit přidáním nanočástic TiO₂. [38]

1.8 Fyzikální vlastnosti

Nedílnou součástí při určování vlastností materiálů je použití některých fyzikálních metod, které jsou předem definovány podle normy. Mezi tyto vlastnosti řadíme vlastnosti hydrofobní, hydrofilní, měření viskozity nebo průměry vláken.

1.8.1 Měření kontaktního úhlu

Měření kontaktního úhlu je důležité pro určení vlastností povrchu a jeho interakce s kapalinou. Kontaktní úhel se měří pomocí speciálního zařízení zvaného kontaktní úhloměr. Podle Ministerstva zdravotnictví [39] se smáčivost pevných povrchů obvykle charakterizuje přímým nebo nepřímým měřením kontaktního úhlu. Kontaktní úhel (smáčecí úhel nebo úhel smáčení) mezi kapalinou a pevnou látkou je úhel, který se samovolně vytvoří, jeli kapka kapaliny umístěna na pevný povrch. Pro danou kapalinu vykazují smáčivé pevné látky nízký kontaktní úhel a nesmáčivé pevné látky vykazují kontaktní úhel 90°, viz obrázek 7.



Obrázek 7 – Schéma pro měření kontaktního úhlu [7]

1.8.2 Viskozita

Viskozita představuje fyzikální charakteristiku vyjadřující odpor látky vůči toku. V případě polymerních roztoků není tato veličina konstantní, nýbrž se mění v závislosti na koncentraci roztoku. S rostoucí koncentrací roztoku polymerů se zvyšuje i hodnota viskozity. Tento jev je popsán Hugginsovou rovnicí, ve které $[\eta]$ reprezentuje limitní viskozitní číslo, c představuje koncentraci polymeru a k_H je Hugginsův koeficient. Parametry k_2 a c_2 jsou důležité při modelování proudění a viskozity v disperzích, polymerních roztocích a podobných systémech. Hugginsova rovnice poskytuje specifický popis viskozity homogenních roztoků lineárních polymerů a umožňuje kvantifikaci jejich viskozitních vlastností v závislosti na koncentraci, viz rovnice 3 níže. [40], [41]

$$\eta = \eta_0 + k_H \cdot c + k_2 \cdot c^2$$

Rovnice 3 – Huggisova rovnice [3]

Limitní viskozitní číslo, označované také jako $[\eta]$, je důležitým parametrem pro charakterizaci viskozitních vlastností polymerů. Toto číslo souvisí s různými parametry, včetně střední kvadratické odchylky vzdálenosti mezi konci lineárního polymerového řetězce. Tento parametr (viz rovnice 4 níže) je odvozen z Fox-Floryho rovnice, která popisuje statistické vlastnosti lineárních polymerních řetězců ve vztahu k jejich délce a rozšíření v roztoku. [42]

$$\eta = \frac{(R^2)^{3/2}}{x}$$

Rovnice 4 – Fox-Floryho rovnice [4]

Berryho číslo je v polymerní vědě důležitým parametrem, který se používá k charakterizaci chování polymerních roztoků. Toto číslo je definováno jako součin limitního viskozitního čísla a koncentrace polymeru a je spojeno s počtem zapletených polymerních řetězců v roztoku. [40]

U zředěných polymerních roztoků, kde jsou polymerové řetězce relativně oddělené a nepřekrývají se, může být hodnota Berryho čísla přibližně jedna. Toto platí zejména

pro roztoky s nízkou koncentrací polymeru. Pokud hodnota Berryho čísla překročí kritickou hodnotu pro daný polymer, může dojít k tvorbě kapének nebo jiných typů agregačních jevů v roztoku. Význam Berryho čísla a limitního viskozitního čísla spočívá v tom, že poskytují důležité informace o chování polymerních roztoků v různých podmínkách a koncentracích. Jejich správné porozumění a interpretace jsou klíčové pro optimalizaci procesů v polymerovém průmyslu a vývoji nových polymerních materiálů.

Limitní viskozitní číslo je také spojeno s molekulovou hmotností polymeru podle Mark-Houwink-Sakuradaova vztahu. Tento vztah je vyjádřen v rovnici 5 uvedené níže, kde K' a a' jsou konstanty závislé na typu polymeru, rozpouštědla a teploty. Polymery s vyšší molekulovou hmotností mají obvykle delší řetězce, což zvyšuje pravděpodobnost zaplétání a viskozitu roztoku. [42]

$$[\eta] = K \cdot \bar{M}_v^{a'}$$

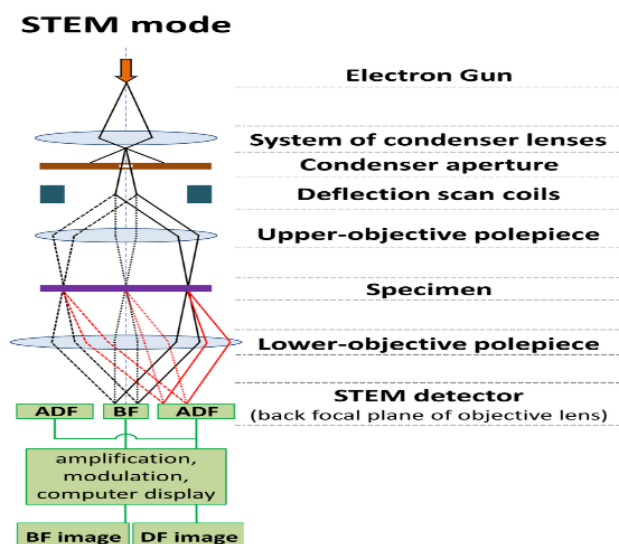
Rovnice 5 – *Mark-Houwink-Sakuraduv vztah* [5]

1.8.3 Mikroskopie

Mikroskopie, která po staletí sloužila jako základní vědecká technika, dodnes zůstává neocenitelným nástrojem v chemii, biologii, zdravotnictví a forenzní vědě. Stále více je integrována do moderních chemických přístrojů a má hodnotu jako výkonný analytický nástroj v mnoha vědeckých oborech. Mikroskopie je oblast vědeckého zkoumání, která se zabývá studiem objektů a struktur mimo dosah lidského zraku. Existuje mnoho typů mikroskopů, ale obecně slouží ke zvětšení a podrobnému zkoumání malých objektů. [43]

Skenovací transmisní elektronová mikroskopie je pokročilá technika mikroskopie, která umožňuje detailní zkoumání struktury materiálů na atomární úrovni (dále také „STEM“). V porovnání s klasickou transmisní elektronovou mikroskopií nabízí STEM výhodu možnosti získávání informací o chemickém složení vzorku a vysokém prostorovém rozlišení současně. Princip STEM spočívá v tom, že paprsek elektronů prochází tenkým vzorkem, a následně se detekuje jeho interakce s materiálem. Paprsek elektronů se nekonzentruje do obrazové roviny, ale místo toho se zaostřuje na malou oblast vzorku. Tato metodika umožňuje získat detailní snímky povrchu a také analyzovat chemické složení vzorku pomocí

interakcí s rozptýlenými elektrony. Díky tomuto přístupu lze dosáhnout vysokého prostorového rozlišení na atomární úrovni, což je klíčové pro detailní studium struktury materiálů. Schéma skenovací transmisní elektronové mikroskopie zobrazuje obrázek 8. [44]



Obrázek 8 – Princip skenovací transmisní elektronové mikroskopie [8]

1.8.4 Ochranný faktor, transmittance a absorbance UV záření

Ochranný faktor pro textilie, často vyjádřený jako UV ochranný faktor (UPF), představuje klíčový parametr pro hodnocení schopnosti textilních materiálů odolávat škodlivému slunečnímu záření. UPF měří, do jaké míry textilie blokuje pronikání ultrafialového záření ze Slunce, což je zvláště důležité s ohledem na potenciální negativní dopady UV záření na lidskou pokožku. UPF hodnoty se obvykle pohybují od nízkých (nižší ochrana) po vysoké (vyšší ochrana) a informují spotřebitele o účinnosti textilie v ochraně před slunečním zářením.

Pro výpočet UPF se provádí testy, při kterých je materiál vystaven slunečnímu záření a měří se množství UV záření, které prochází materiálem. Vyšší UPF hodnoty indikují větší odolnost materiálu vůči UV záření. Tento parametr je klíčový zejména při výrobě oděvů určených pro venkovní aktivity, sporty a rekreační aktivity, kde je vystavení Slunci častější. Textilie s vysokým UPF hrají klíčovou roli v prevenci slunečního popálení a v dlouhodobé ochraně pokožky před nežádoucími účinky UV záření. [45]

Transmittance textilních materiálů je důležitým faktorem, který kvantifikuje jejich

schopnost propouštět elektromagnetické záření, zejména světlo. Tato vlastnost je klíčová při hodnocení průhlednosti a viditelnosti textilií, jež mohou být použity například ve stínících nebo dekoračních prvcích. Transmittance (TT) je definována jako podíl světla procházejícího materiálem k celkové intenzitě světla dopadajícího na něj. V průmyslu textilních materiálů mohou výrobci optimalizovat transmittanci v závislosti na požadovaném účelu, jako je dosažení správné úrovně průhlednosti nebo omezení procházejícího světla pro ochranu před slunečním zářením.

Pro měření transmittance se často používá spektrofotometrie, která umožňuje získat údaje o transmittanci v různých částech elektromagnetického spektra. Optimalizace transmittance materiálu může být důležitá také v oblastech, kde je potřeba kontrolovat teplotu, například v textilních materiálech pro okenní záclony nebo oděvní materiály pro venkovní aktivity, kde je žádoucí udržovat pohodlné klimatické podmínky. [46]

Absorbance textilních materiálů odráží schopnost absorbovat elektromagnetické záření, což může být klíčové pro různé aplikace – od oděvů až po technické textilie. Absorbance (AA) je často měřena v kontextu UV ochrany, kde indikuje, do jaké míry materiál pohlcuje škodlivé ultrafialového záření ze Slunce. Výrobci textilních materiálů se snaží optimalizovat absorbanci tak, aby minimalizovali pronikání UV záření na pokožku. To je zvláště důležité v oblasti oděvního průmyslu, kde je ochrana před slunečním zářením klíčovým faktorem.

K měření absorbance se často používají spektrofotometry, které umožňují kvantitativní hodnocení absorpčních vlastností materiálu v různých vlnových délkách. Různé barviva nebo chemické látky používané při barvení či úpravě textilních materiálů mohou mít různý vliv na absorbanci. V průmyslových odvětvích může být optimalizace absorbance také klíčová pro dosažení specifických vlastností materiálu jako tepelná izolace a odolnost vůči UV záření, což posiluje funkční a ochranné vlastnosti. [47]

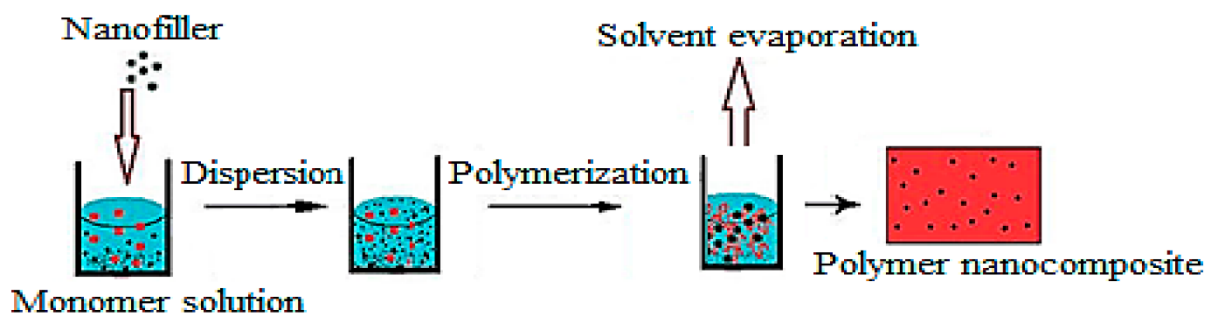
1.9 Nanokompozitní materiály

Nanokompozitní materiál jsou materiály, ve kterých jsou nanomateriály, částice nebo struktury s rozměry rozsahu nanometrů pečlivě distribuovány a zahrnuty do matrice jiného materiálu. Tyto materiály využívají vlastnosti nanomateriálů. Při rapidním snížení rozměru plniva bez zásahu do materiálu jako takového můžeme dosáhnout u materiálu nových vlastností. Mezi tyto vlastnosti patří vodivost, pevnost, tažnost i odolnost proti UV záření. Díky využití plniv s rozměry v řádech nanometrů dochází na rozhraní plniva a matrice

ke zdokonalení vzájemné vazby. [48]. Tato skutečnost je hlavním důvodem s následkem v podobě zlepšení vlastností výsledného kompozitního materiálu. Důležitý bod ve vývoji nanokompozitních materiálů nastal v roce 1991, kdy Sumio Iijima objevil uhlíková nanovláčna, která jsou jedny z nejrozšířenějších plniv v nanokompozitních materiálech, především díky objevu zpracování uhlíkových nanovláken předem do kompozitních materiálů a jejich použití v textilním průmyslu. [49, 50]

1.9.1 Polymerní nanokompozitní materiály

Polymerní kompozity se skládají ze dvou hlavních složek: polymerní matrice a nanomateriálu. Polymer tvoří základní strukturu, do které jsou nanomateriály dispergovány. Tyto nanomateriály mohou být ve formě nanotrubiček, nanokuliček, nanočástic nebo jiných nanostruktur. Výroba těchto materiálů může probíhat různými způsoby, oblíbenými metodami jsou například metody *in situ* polymerace, extruze nebo elektrospinning. Důležité je zajistit homogenní disperzi nanomateriálů v polymerní matrici, viz obrázek 9. [51]



Obrázek 9 – Princip výroby nanokompozitních materiálů [9]

1.9.2 Použití nanokompozitních materiálů

Kompozitní materiály mají širokou škálu aplikace v různých odvětvích průmyslu a technologií. Například v leteckém a kosmickém průmyslu se používají do konstrukcí letadel, včetně trupů, křídel a ocasních ploch. Tyto materiály se vyznačují nízkou hmotností, čímž snižují váhu letadel a tím zvyšují jejich účinnost. Ve vesmírných aplikacích jsou využívány pro stavbu satelitů či částí raket. V automobilovém průmyslu jsou polymerní

kompozity využívány pro výrobu lehkých a pevných částí vozidel, což přispívá ke snížení spotřeby pohonných hmot a ke snižování produkovaných emisí. Důležité aplikace jsou karoserie, rámy a interiéry automobilů. Výrobci stavebních materiálů využívají tyto kompozity pro výrobu odolných lehkých konstrukcí. To zahrnuje také výrobu betonu s vlákny z uhlíkových nebo skleněných materiálů, které takto zvyšují pevnost betonu.

Výše jsou uvedeny jen některé z mnoha oblastí, kde se polymerní kompozity používají. Jejich aplikace jsou různorodé a neustále se vyvíjí, což přináší inovace a vylepšení v mnoha průmyslových odvětvích. [52]

2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Úvod experimentální části je zaměřen na zkoumání kompozitního materiálu v roztoku, zvlákňování a následná měření. Prvním krokem je příprava kompozitního materiálu a jeho klíčových vlastností. Následuje proces zvlákňování, který představuje klíčový aspekt v ovlivňování mechanických charakteristik materiálu.

Měření viskozity umožní získat informace o povrchových vlastnostech materiálu. Tato část experimentu poskytne důležité poznatky pro následné navržení procesu zpracování či optimalizaci pro konkrétní aplikace. Dále je pozornost věnována měření vodivosti, což je klíčové pro porozumění elektrickým vlastnostem kompozitního materiálu. Tato část umožní zhodnotit schopnost materiálu vést proud a jeho potenciální využití v technologických oblastech.

Dále se experimentální část věnuje mikroskopii a detailnímu měření průměru vláken a plošné hmotnosti. Mikroskopická analýza umožní důkladné zkoumání struktury kompozitního materiálu na úrovni vláken. Toto měření je klíčové pro pochopení morfologie a distribuce vláken, což má významný vliv na mechanické a fyzikální vlastnosti materiálu. V této fázi experimentu je za účelem ověření provedena kontrola, zda při jednotné odtahové rychlosti podkladového materiálu došlo ke zvýšení plošné hmotnosti.

Měření kontaktního úhlu je důležité pro porozumění hydrofobního či hydrofilního chování vůči kapalinám. Tento poznatek dává informace, jež budou klíčové při výrobě nebo dalších aplikacích kompozitních materiálu. I povrchové napětí je důležitým parametrem při charakterizaci kapalin a jejich interakcí s povrchy. Měření povrchového napětí umožňuje porozumění fyzikálním vlastnostem kapalin a také interakcím mezi kapalinou a pevnými povrchy. Povrchové napětí hraje důležitou roli při tvorbě suspenzí. Snížení povrchového napětí může vést k menší agregaci částic v suspenzi, což umožňuje rovnoměrnější rozptýlení částic v kapalině.

Závěr experimentální části v podobě měření ochranného faktoru pomůže určit, jak efektivně materiál chrání proti UV záření. To je důležité zejména v případě, že se zkoumá ochranná vrstva nebo složení materiálu, který je náchylný k poškození UV zářením. Měření transmitance a absorbance může být klíčové při vývoji a optimalizaci různých aplikací, jako

jsou ochranné oblečení, sluneční filtry, skla, plastové materiály a další, které mají být schopny filtrovat či absorbovat UV záření.

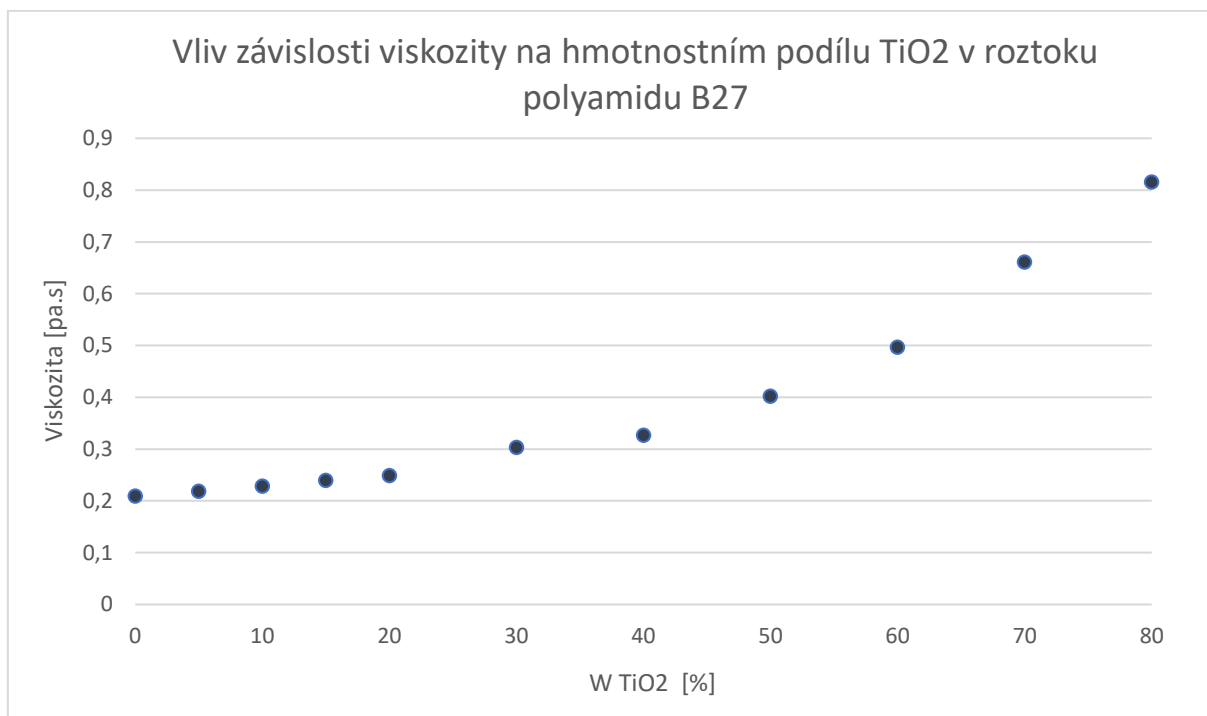
2.1 Příprava polymerních roztoků

Pro přípravu polymerních roztoků byl využit polyamid 6 (Ultramid B 27). Jako rozpouštědlový systém byla zvolena směs kyseliny octové a kyseliny mravenčí v poměru 2: 1.

Polyamid byl rozpouštěn na magnetickém míchadle při 300 Rpm za pokojové teploty po dobu 24 hodin. Po rozpuštění byly do roztoku přidány částice TiO_2 , a to v koncentracích 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 hm. % z celkové hmotnosti roztoku. Po přidání částic TiO_2 do roztoku došlo k homogenizaci roztoku pomocí ultrazvukového sonifikátoru při amplitudě 35 % po dobu 30 sekund. Homogenizace proběhla při dvou cyklech.

2.2 Měření viskozity

Měření viskozity bylo provedeno na přístroji Thermo roto visco při teplotě 21 °C. U každého vzorku bylo měření opakováno 5×, následně byly zprůměrované hodnoty vyneseny do grafu na obrázku 10.

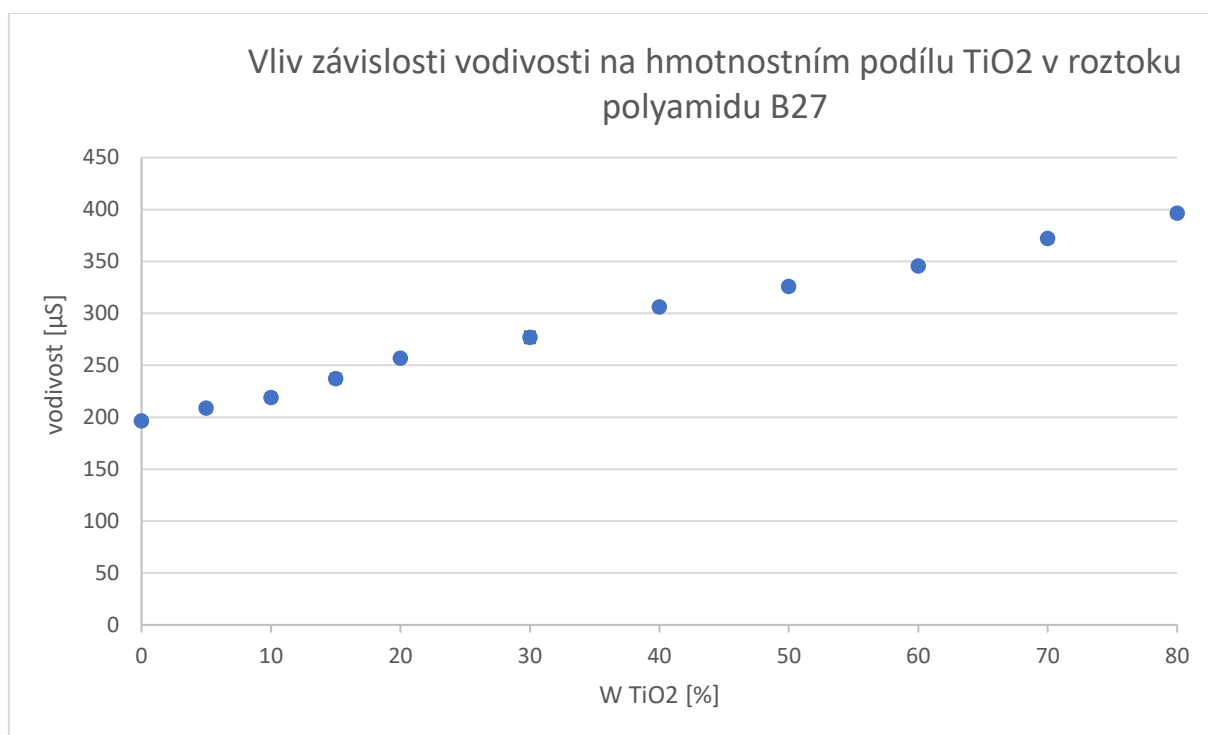


Obrázek 10 – Vliv závislosti viskozity na hmotnostním podílu TiO_2 v roztoku polyamidu [10]

Měření viskozity v závislosti na koncentraci TiO_2 v polyamidu poskytuje cenné poznatky o chování materiálu. Výsledky ukazují, že se viskozita zvyšuje s rostoucí koncentrací TiO_2 až do 80 %, což naznačuje, že TiO_2 má významný vliv na reologické vlastnosti materiálu. Avšak při ještě vyšší koncentraci dochází k nadměrnému zvýšení viskozity, což může být považováno za nežádoucí.

2.3 Měření vodivosti

Vodivost byla měřena na přístroji od firmy Chromservis EUTECH instruments noc 510. Každý vzorek byl měřen 10×, zprůměrován a přenesen do grafu na obrázku 11.



Obrázek 11 – Vliv závislosti vodivosti na hmotnostním podílu TiO_2 v roztoku polyamidu [11]

Vyhodnocení měření naznačuje, že koncentrace TiO_2 má významný vliv na vlastnosti polymerního materiálu, zejména vodivosti. Vyšší koncentrace TiO_2 zvyšuje vodivost díky polovodičovým vlastnostem tohoto materiálu. Nicméně nad 70% koncentrací TiO_2 se materiál stává nezvláknitelným a není možné vytvářet vlákna. Tento jev je pravděpodobně způsoben aglomerací částic, tedy jevem, kdy se částice TiO_2 shlukují a nedochází k jejich rovnoměrné distribuci.

2.4 Bezjehlové zvlákňování polyamidu B27

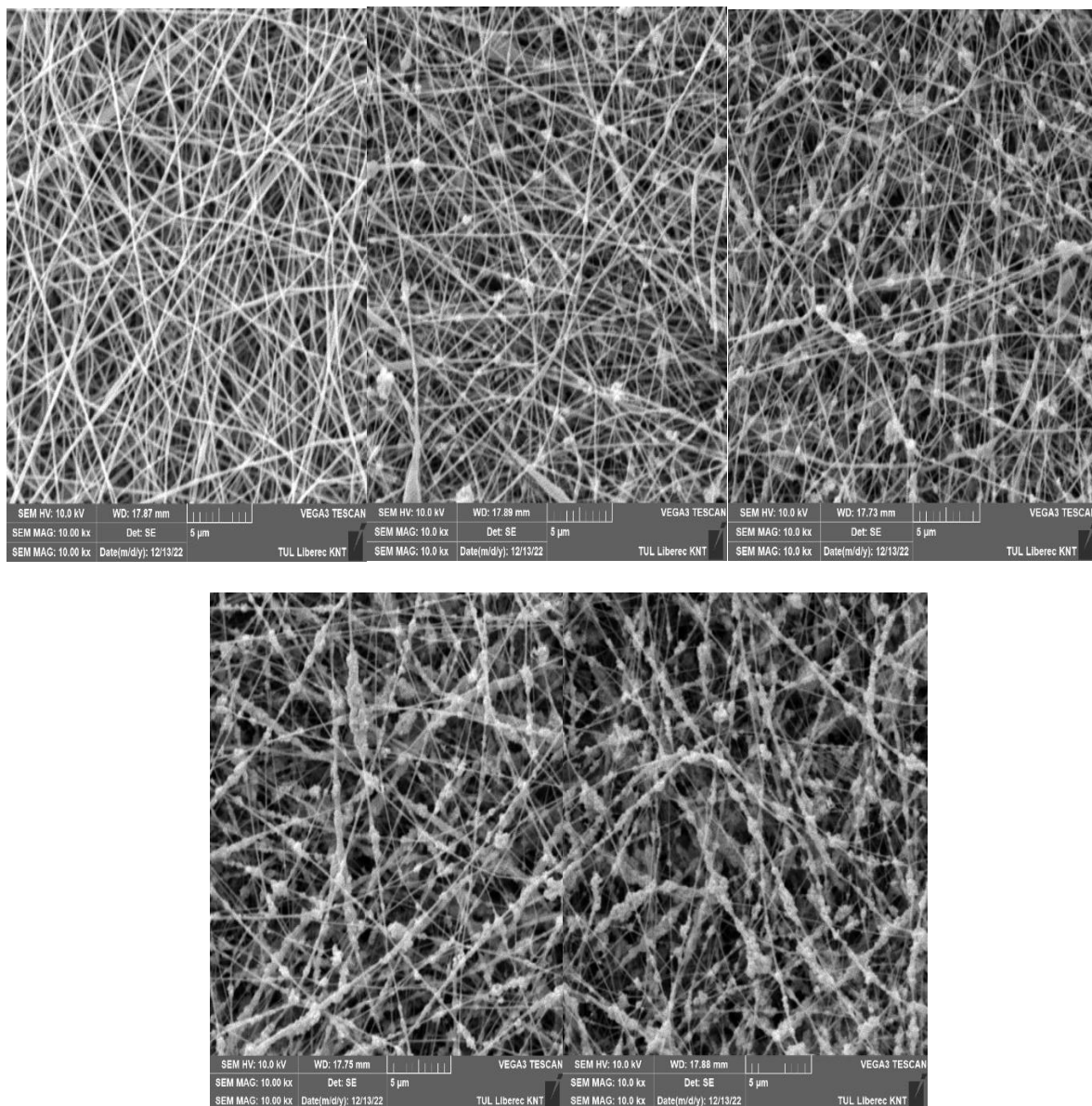
Pro zvlákňování bylo použito zařízení Nanospider NS 1WS500U. Použité parametry zvlákňování jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1 – Parametry zvlákňování

Vzdálenost kolektoru od elektrody	180 mm
EMW	320
Napětí elektrody	50 kV
Napětí kolektoru	-10 kV
Odtahová rychlost spoudbondu	10 mm/min
Průvlak	0,7 mm
Teplota	22 °C
Vlhkost	40 %

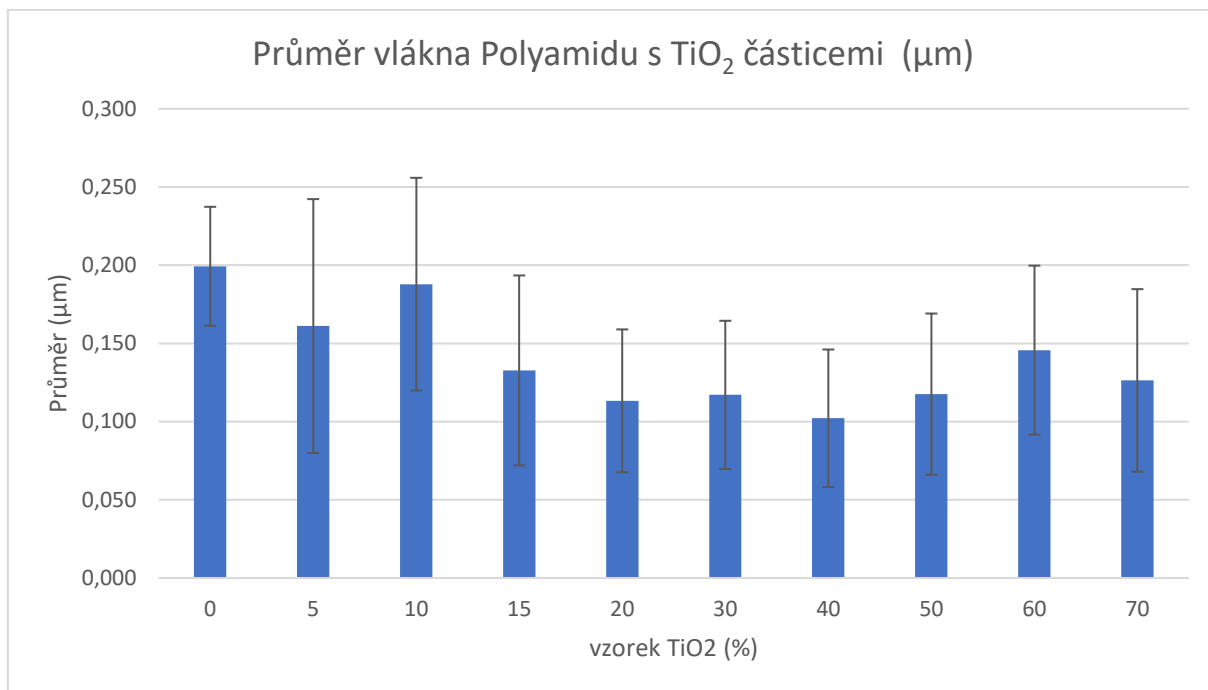
2.5 Měření průměru vláken pomocí mikroskopie

Při teplotě prostředí 22 °C a vlhkosti 40 % bylo provedeno zvlákňování podle výše uvedených parametru. Byly použity všechny připravené roztoky, a to postupně podle obsahu oxidu titaničitého ve vzorcích polyamidu B27 a následně zvlákňovány. Podle snímků získaných skenovacím elektronovým mikroskopem níže na obrázku 12 lze pozorovat detailní strukturu vláken v závislosti na obsahu oxidu titaničitého ve vzorcích. Analyzované snímky poskytují informace o struktuře vláken.



Obrázek 12 – Snímky nanovláken pořízené skenovací elektronovým mikroskopem při zvětšení 10000x [12]

Pomocí skenovacího elektronového mikroskopu byly určeny průměry vláken, které jsou uvedeny v grafu na obrázku 13. Jednotlivé vzorky byly podrobeny 100 měřením a následně zprůměrovány. V tabulce 2 níže jsou uvedeny také hodnoty plošné hmotnosti a směrodatné odchylky.



Obrázek 13 – Průměry vláken [13]

Průměr vláken má tendenci klesat s rostoucí koncentrací TiO_2 ve vzorku až do určitého bodu. Tento trend je pozorovatelný až do koncentrace 20 %, kde průměr vláken dosahuje minima. Změřené hodnoty průměru vláken se mohou v jednotlivých koncentracích mírně lišit. Tato variabilita může být způsobena různými faktory, včetně techniky měření a vlastností samotného materiálu.

Tabulka 2.- Plošná hmotnost vyrobených nanovláknenných vrstev s TiO₂ částicemi

Vzorek	Plošná hmotnost [g/m ²]
0 % TiO ₂	3
5 % TiO ₂	3,1
10 % TiO ₂	3,9
15 % TiO ₂	4,2
20 % TiO ₂	4,6
30 % TiO ₂	6,3
40 % TiO ₂	6,8
50 % TiO ₂	8,3
60 % TiO ₂	10,6
70 % TiO ₂	11,3

Z měření plošné hmotnosti vzorků s různými koncentracemi TiO₂ vyplývá, že plošná hmotnost stoupá s rostoucí koncentrací TiO₂ při zachování jednotné odtahové rychlosti podkladového materiálu. Tento nárůst není lineární, což naznačuje nelineární vztah mezi koncentrací TiO₂ a plošnou hmotností. Vyšší koncentrace TiO₂ mohou vést k hustší a těžší struktuře materiálu.

2.6 Elementární analýza

Za účelem ověření toho, zda skutečně došlo ke zvýšení plošné hmotnosti v důsledku přidání částic TiO₂, byla provedena elementární analýza. Elementární analýza CHNS byla provedena pomocí Elementar vario EL Cube. Analýza byla provedena s acetanilidovým standardem v modulu CHNS při <0,1 % abs. pro každý prvek. Byla použita metoda 5 mg 90 s. Pro účely analýzy byly připraveny dva 5 mg vzorky z každého vzorku. Získané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.

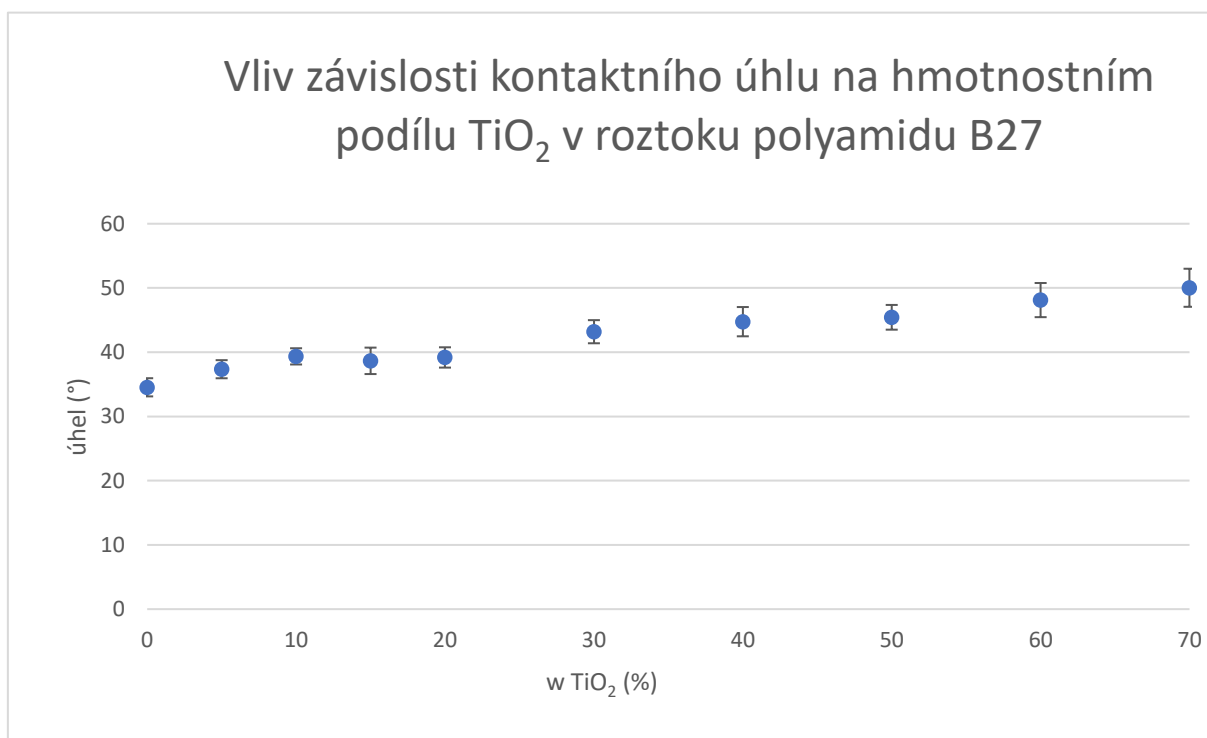
Tabulka 3 – Procentuální zastoupení prvků a částic ve vzorku

Vzorek	% N	% C	% H
0 % TiO ₂	11,68	61,51	9,86
5 % TiO ₂	10,08	52,93	8,49
10 % TiO ₂	7,09	37,21	5,86
15 % TiO ₂	6,79	35,64	5,62
20 % TiO ₂	5,90	30,71	4,79
30 % TiO ₂	4,35	21,71	3,47
40 % TiO ₂	3,41	17,82	2,68
50 % TiO ₂	2,76	14,62	2,15
60 % TiO ₂	2,34	12,31	1,75
70 % TiO ₂	1,91	10,08	1,38

Z naměřených hodnot je zřejmé, že ve vrstvách s vyšším množstvím TiO₂ klesá zastoupení všech měřených prvků. Obsah uhlíku v nanovlákně bez přidaných částic je 61,51 %, zatímco obsah uhlíku v nanovlákně se 70 % TiO₂ je pouze 10 %.

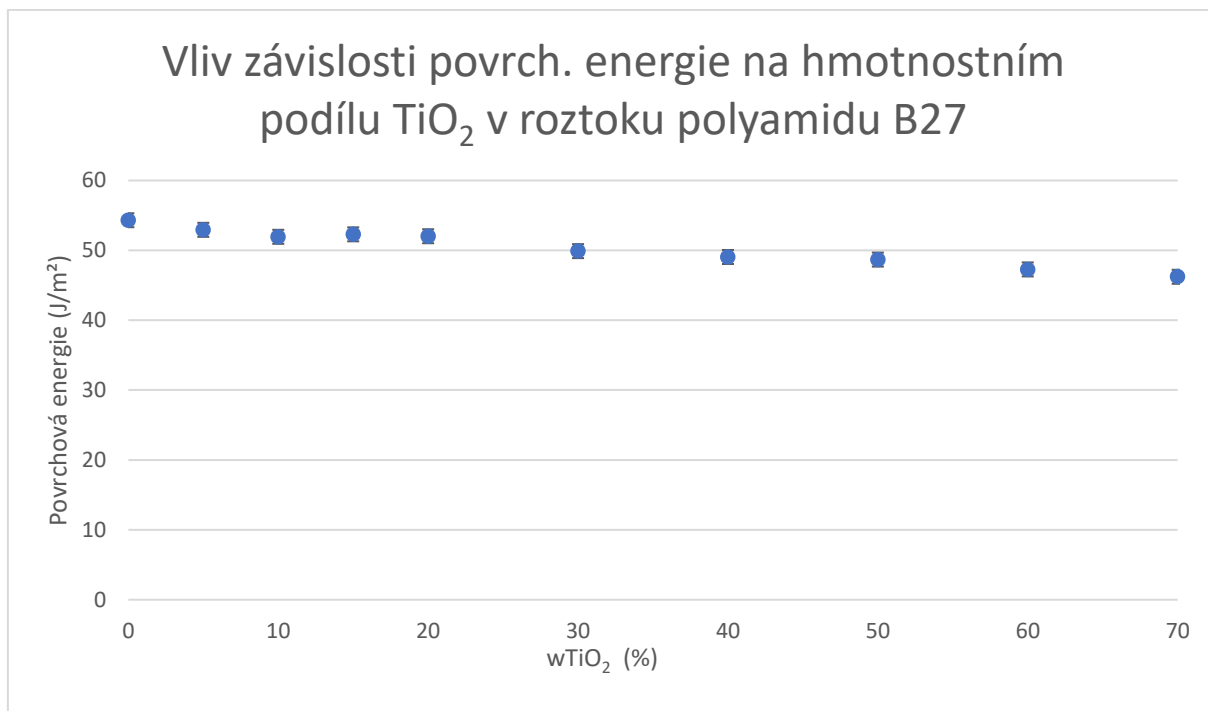
2.7 Měření kontaktního úhlu

Ke stanovení kontaktního úhlu byl použit přístroj See Systém E (Advex Instruments, Česká republika). Jako testovaná kapalina byla použita destilovaná voda (10 μ l) a na každém vzorku bylo provedeno 30 měření, které byly následně přeneseny do grafu na obrázku 14. Povrchová energie byla vypočtena pomocí Kwok-Neumannova modelu a z výsledků byl vyhotoven graf na obrázku 15.



Obrázek 14 – Vliv závislosti kontaktního úhlu na hmotnostním podílu TiO₂ v roztoku polyamidu [14]

Při tomto experimentu nebyl zaznamenán významný vliv na změnu hydrofilnosti. Byl pozorován pouze nepatrný nárůst. Celková vlastnost polyamidu s obsahem TiO₂ se ukázala jako stabilní. Tato nepatrná změna naznačuje omezený dopad TiO₂ na hydrofilní charakter materiálu. Výsledky naznačují, že přidaný TiO₂ není dominantním faktorem v modifikaci hydrofilních vlastností polyamidových vláken.

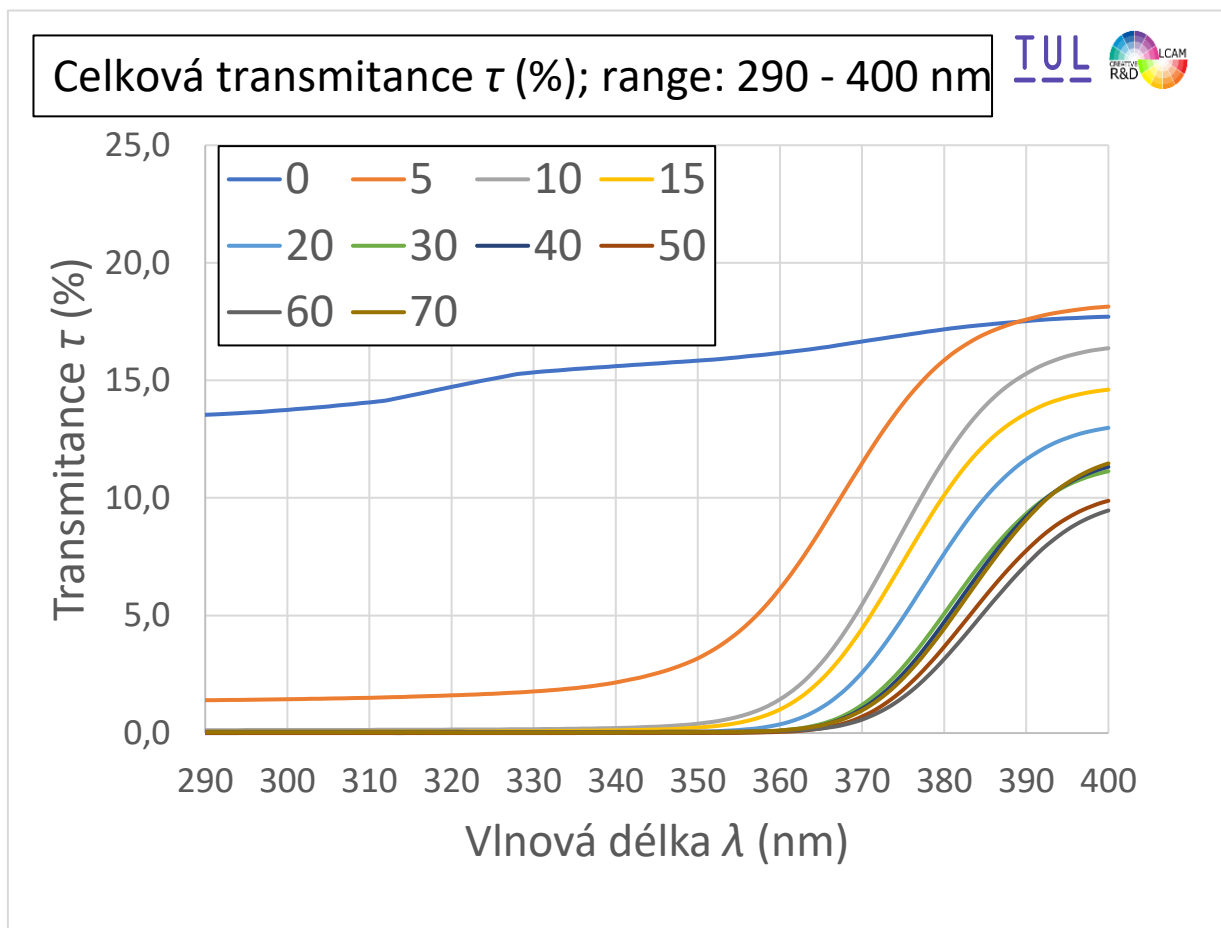


Obrázek 15 – *Vliv závislosti povrch. energie na hmotnostním podílu TiO_2 v roztoku polyamidu [15]*

Z průběhu měření je zřejmé, že dochází ke snižování povrchové energie, a to po přidání TiO_2 až do 70 % hmotnostního podílu. Zvýšení koncentrace TiO_2 může ovlivnit vlastnosti povrchu vlákna. Dle obrázku 15 uvedeného výše je zřejmé, že má graf lineární průběh.

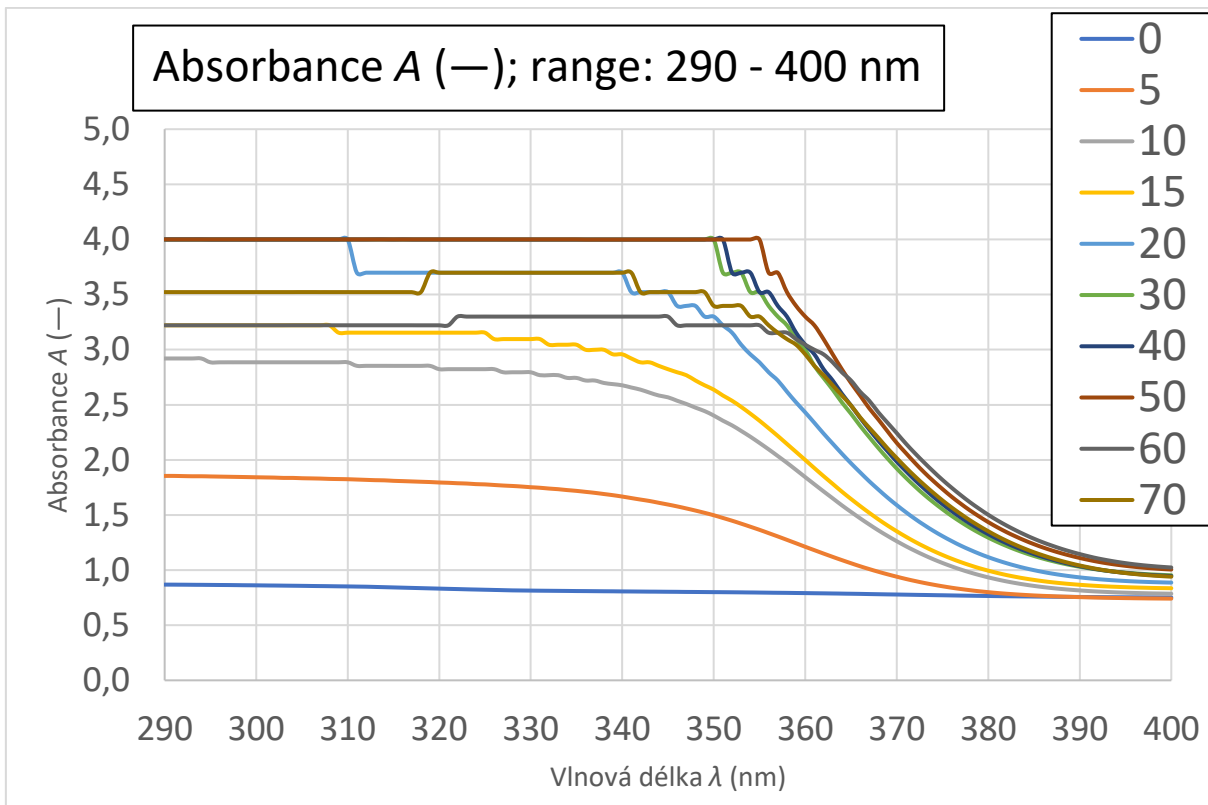
2.8 Měření ochranného faktoru, transmittance a absorbance UV záření

Také byl zkoumán vliv částic TiO_2 na absorpci UV záření. Měření bylo provedeno na zařízení Shimadzu UV-3101PC. Obrázek 16 níže ukazuje transmittanci vyrobených nanovlákných vrstev TiO_2 .

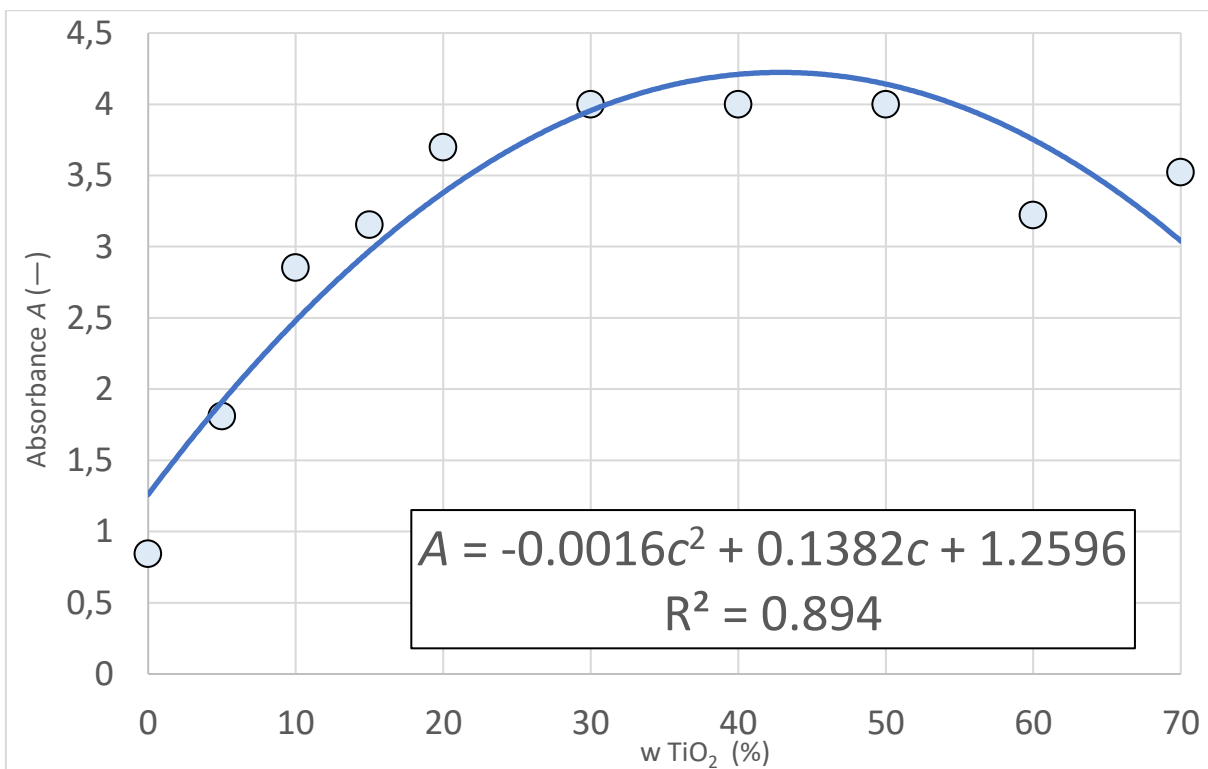


Obrázek 16 – Vliv závislosti transmittance na vlnové délce [16]

Z hodnot transmittance na obrázku 16 výše je zřejmé, že UV záření projde nanovláknou vrstvou bez přidaných částic a s 5 % TiO_2 . V případě nanovlákných vrstev s vyšším množstvím TiO_2 dochází k záchytu UV záření až do vlnové délky 350 nm.



Obrázek 17 – Vliv závislosti absorbance na vlnové délce [17]



Obrázek 18 – Vliv závislosti absorpce na hmotnostním podílu TiO_2 v roztoku polyamidu [18]

Na obrázcích 17 a 18 výše lze vidět vyšší absorpci UV záření díky vyššímu množství částic TiO_2 . U vrstev se 30, 40 a 50 % TiO_2 byly naměřeny mezní hodnoty přístroje a u vrstev se 60 a 70 % TiO_2 dokonce nastal pokles absorpce. Pravděpodobně v tomto případě došlo k poklesu kvůli nadměrnému obsahu částic TiO_2 v nanovlákných vrstvách, což vedlo ke snížení mechanické pevnosti a poškození těchto vrstev. Dále mohlo dojít i k agregaci částic.

Tabulka 4 – Závislost ochranného faktoru na obsahu TiO_2 ve vzorku Polyamidu 6

Vzorek	UPF
0 % TiO_2	7
5 % TiO_2	51
10 % TiO_2	233
15 % TiO_2	315
20 % TiO_2	496
30 % TiO_2	707
40 % TiO_2	737
50 % TiO_2	966
60 % TiO_2	663
70 % TiO_2	659

V případě UPF se ochranný faktor zvyšuje díky vyššímu množství částic TiO_2 v nanovlákných vrstvách. Nejvyšší hodnoty bylo dosaženo při 50 % TiO_2 , u vrstev se 60 a 70 % TiO_2 došlo k poklesu UPF, také v tomto případě je to způsobeno poklesem mechanické pevnosti nebo došlo ke stejnému jevu agregace částic, jako je uvedeno výše.

ZÁVĚR

Tato studie byla zaměřena na zvlákňování polyamidu s postupně rostoucím obsahem částic TiO_2 . Studie poskytuje hluboký pohled do vývoje fyzikálních vlastností materiálu a jeho potenciálu v odvětví textilního inženýrství. V průběhu experimentu byl sledován vliv obsahu částic TiO_2 na viskozitu, vodivost, průměr vláken, plošnou hmotnost, kontaktní úhel a ochranný faktor proti UV záření.

Příprava polymerního roztoku polyamidu 6 s různými koncentracemi oxidu titaničitého proběhla úspěšně až do 70 hm. % z celkové hmotnosti roztoku. Překročení 70% koncentrace částic TiO_2 může vést k přehlcení roztoku, kdy se částice začínají shlukovat a sedimentovat, což vede k nehomogenitě a obtížím při následném zvlákňování.

Významné změny byly pozorovány při měření viskozity a vodivosti v závislosti na koncentraci TiO_2 . Postupné zvyšování obsahu TiO_2 vedlo k nárůstu vodivosti a viskozity, což ukazuje na významný vliv částic TiO_2 na elektrické a reologické vlastnosti materiálu.

Vzorky s nižším obsahem TiO_2 (0 %, 5 %, 10 %) vykazují obvykle větší průměr vláken, zatímco nad koncentrací 10 % došlo ke snížení průměru. TiO_2 vykazuje tendenci podporovat tvorbu menších vláken v polyamidové struktuře, což bude způsobeno vyšší vodivostí polymerního roztoku.

Materiály s vyšší plošnou hmotností mohou nalézt uplatnění v aplikacích vyžadujících vyšší pevnost nebo hustotu, jako jsou odolné textilie, filtry nebo technické tkaniny. Další analýzy jsou potřebné pro lepší pochopení vztahu mezi koncentrací TiO_2 a plošnou hmotností a pro optimalizaci vlastností materiálu pro konkrétní aplikace.

Z naměřených hodnot elementární analýzy je zjevné, že ve vrstvách s vyšším množstvím TiO_2 došlo k významnému poklesu zastoupení uhlíku a dalších měřených prvků, bylo tím tedy potvrzeno vyšší množství TiO_2 částic ve vlákenných vrstvách.

Při měření kontaktního úhlu vyšlo najevo, že došlo ke změnám povrchové energie s postupným přidavkem TiO_2 do polyamidu. Zvýšení koncentrace TiO_2 může mít vliv na rozhraní mezi polyamidovými vlákny a okolním prostředím, což může ovlivnit povrchovou

energii. Je důležité provést další analýzu a experimenty, aby bylo možné lépe porozumět vlivu TiO₂ na povrchovou energii polyamidových vláken.

Dále byl sledován ochranný faktor proti UV záření. Pozorovali jsme pozitivní korelaci s obsahem TiO₂ až do koncentrace 50 %, kde však došlo k nečekanému poklesu hodnot. Tento fenomén indikuje možné sofistikované mechanismy interakce mezi TiO₂ a UV zářením, jež jsou klíčové pro celkovou ochranu materiálu. Dále mohlo dojít k agregaci částic, což by snížilo účinnost ochrany, nebo ke vzniku nerovnoměrného rozložení TiO₂ v polyamidových vláknech, což mohlo vést ke zkresleným výsledkům. Pro lepší pochopení je nutné provést další analýzy a podrobněji prozkoumat tuto problematiku.

Celkově výsledky poskytují důležité poznatky pro průmyslovou aplikaci polyamidových materiálů s TiO₂. Přestože byly identifikovány pozitivní trendy ve vodivosti a ochranném faktoru proti UV záření, bude pro dosažení plného porozumění těmto jevům nutné hlubší zkoumání strukturálních a optických změn v materiálu.

Studii lze považovat za důležitý krok směrem k optimalizaci vlastností polyamidových materiálů s TiO₂. Tyto výsledky mohou posloužit jako základ pro další výzkum a inovace v oblasti vývoje pokročilých textilních materiálů s důrazem na elektrické, fyzikální i optické charakteristiky.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Nanotechnologie: Definice nanotechnologie. [Http://www.nanocastice.cz/definice-nanotechnologie/](http://www.nanocastice.cz/definice-nanotechnologie/) [online]. [vid. 2023-08-04]. Dostupné z: <http://www.nanocastice.cz/definice-nanotechnologie/>
- [2] SupapholP, Mit-uppatham C, Nithitanakul M. Ultrafine electrospun polyamide-6 fibers: effects of solvent systém and emitting electrode polarity on morphology and average fiber diameter. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2005; 290(9):933–942. [vid. 2023-08-04]
- [3] Geoffrey R Mitchell. *Royal Society of Chemistry. Electrospinning: Principles, Practice and Possibilities*. (2015). Velká Británie: Royal Society of Chemistry. [online]. ISBN: 9781849735575, 1849735573. [vid. 2023-08-04]
- [4] Brown, Phil a Stevens, Kate. *Nanofibers and Nanotechnology in Textiles*. Ilustrované vydání, dotisk. Elsevier Science, 2007. [online] ISBN 978-1-84569-105-9. [vid. 2023-20-04]
- [5], John W Schweizer, D.N Hanson, Stability limit of charged drops, *Journal of Colloid and Interface Science*, Volume 35, Issue 3,1971, Pages 417-423, [online]. ISSN 0021-9797. [vid. 2023-21-04]
- [6] Lautrup, B. (2005). *Physics of Continuous Matter: Exotic and Everyday Phenomena in the Macroscopic World*. Velká Británie: Taylor & Francis, [online]. ISBN: 9780750307529, 0750307528, [vid. 2023-21-04].
- [7] *Nanofibers and Nanotechnology in Textiles*. (2007). Velká Británie: Elsevier Science, [online]. ISBN 9781845693732, [vid. 2023-21-04]. Dostupné z: https://www.google.cz/books/edition/Nanofibers_and_Nanotechnology_in_Textile/iau_jAgAAQBAJ?hl=cs&gbpv=0
- [8] *Engineered Polymer Nanocomposites for Energy Harvesting Applications*. (2022). Nizozemsko: Elsevier Science. ISBN: 9780128241554, 0128241551. [vid. 2024-21-04].
- [9] Taylor, GI., *Proc. R. Soc. London* 1966 A313, p. 453 [online]. [vid. 2023-08-04]

- [10] Pantano, C., Ganan-Calvo, A.M. and Barrero A., J. Aerosol Sci. 1994 35, p417[online]. [vid. 2023-08-04]
- [11] Jet Break-up in Electrohydrodynamic Atomization in the Cone-jet mode, Journal of Aerosol Science, Volume 31, Issue 1, 2000, Pages 65-95, ISSN 0021-8502. [online]. [vid. 2023-06-22]
- [12] R.P.A. Hartman, D.J. Brunner, D.M.A. Camelot, J.C.M. Marijnissen, J.C.M. and B. Scarlett, J. Aerosol sci. (2000)31, p. 65. [online]. [vid. 2023-06-22]
- [13] Nanospider. In: *NS LAB 500S* [online]. [vid. 2023-06-27].
Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-and-photograph-of-electrospinning-setup-NS-LAB-500S-Elmarco_fig1_234013501
- [14] Valkova, M., Nguyen, S., Senokos, E., Razavi, S., Kucernak, A. R. J., Anthony, D. B., ... & Greenhalgh, E. S. (2023). Current collector design strategies: The route to realising scale-up of structural power composites. *Composites Science and Technology*, 236, 109978. [online]. [vid. 2023-06-27]
- [15] Vaquette, C., & Cooper-White, J. J. (2011). Increasing electrospun scaffold pore size with tailored collectors for improved cell penetration. *Acta biomaterialia*, 7(6), 2544-2557. [online]. [vid. 2023-06-28]
- [16] Afshari, M. *Electrospun Nanofibers*. Woodhead Publishing. 2017. 648 s. ISBN 978-0-08-100907-9. [online]. [vid. 2023-08-04]
- [17] Umiati, N. A. K., Kadarisman, V. G. S., Subagio, A., & Wandono, K. (2019). A simple homemade electrospinning for nanoscale fibres production. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 125, p. 12001). EDP Sciences. [online]. [vid. 2023-06-30]
- [18] Ellis B., Smith R., *Polymers a property database*, Secound edition, ISBN 9781420005707. [online]. [vid. 2023-11-02]. Dostupné z: [yyhttps://www.perlego.com/book/1696292/polymers-a-property-database-second-edition](https://www.perlego.com/book/1696292/polymers-a-property-database-second-edition)
- [18] Carraher, C. (2017). *Introduction to Polymer Chemistry* (4th ed.). CRC [online]. [vid.

- 2023-11-02]. Dostupné z: <https://www.perlego.com/book/1575715/introduction-to-polymer-chemistry-pdf>
- [20] Penzkofer, R., Wu, Y. (2012). *Polymer Chains: Structure, Physical Properties, and Industrial Uses*. Spojené státy americké: Nova Science Publishers. ISBN: 9781621004226, 1621004228 [online]. [vid. 2023-011-02].
- [21] Schubert, U., Newkome, G., & Winter, A. (2021). *Supramolecular Polymers and Assemblies* (1st ed.). Wiley. [online]. [vid. 2023-011-02]. Dostupné z: <https://www.perlego.com/book/2322387/supramolecular-polymers-and-assemblies-from-synthesis-to-properties-and-applications-pdf>
- [22] Zhao, Z., Hu, R., Qin, A., & Tang, B. Z. (2019). *Synthetic Polymer Chemistry* (1st ed.). Royal Society of Chemistry. [online]. [vid. 2023-11-02]. Dostupné z: <https://www.perlego.com/book/1244390/synthetic-polymer-chemistry-innovations-and-outlook-pdf>
- [23] Sahin, Y. M., Su, S., Ozbek, B., Yücel, S., Pinar, O., Kazan, D., ... & Gunduz, O. (2018). Production and characterization of electrospun fish sarcoplasmic protein based nanofibers. *Journal of Food Engineering*, 222, 54-62. [online]. [vid. 2023-06-22] Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877417304867>
- [24] R. Khajavi, M. Abbasipour, 5 - Controlling nanofiber morphology by the electrospinning process, Editor(s): Mehdi Afshari, In *Woodhead Publishing Series in Textiles, Electrospun Nanofibers*, Woodhead Publishing, 2017, Pages 109-123, ISBN 9780081009079, [online]. [vid. 2023-06-22] Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081009079000052>
- [25] Hsu C-M, Shivkumar S. Nano-sized beads and porous fiber constructs of poly(ϵ -caprolactone) produced by electrospinning. *Journal of Materials Science*. 2004;39(9):3003–3013. [online]. [vid. 2023-06-07]
- [26] Casper CL, Stephens JS, Tassi NG, Chase DB, Rabolt JF. Controlling surface morpholog of electrospun polystyrene fibers: effect of humidity and molecular weight in the electrospinning process. *Macromolecules*. 2004; 37(2): 573–578. [online]. [vid. 2023-06-07]

- [27] Wang, X., Lin, T. (2013). Needleless Electrospinning of Nanofibers: Technology and Applications. Singapur: Jenny Stanford Publishing. [online]. [vid. 2023-06-22]
- [28] K.Möls., Aarik, H.Mändar, A. Kasikov, A. Niilisk, R. Rammula, et al., Influence of phase composition on optical properties of TiO₂: dependence of refractive index and band gap on fomration of TiO₂-II phase in thin films, Opt. Mater. 96 (2019) 109335. [online]. [vid. 2023-06-22]
- [29] DI Paola, A., M. Bellardita a L. Palmisano. Brookite, the LeastKnown TiO₂ Photocatalyst. Catalysts [online]. 2013, 3(1), 36-73 [cit. 2022-0629]. ISSN 2073-4344. Dostupné z: doi:10.3390/catal3010036 [online]. [vid. 2023-08-23]
- [30] M.Diebold, Application of Light Scattering to Coatings. A User's Guide, Springer International, 2014. ISBN: 978-3-319-12014-0. [online]. [vid. 2023-08-23]
- [31] R.fujiwara, Y. Luo, T. Sasaki, K. Fujii, H. Ohmori, H. Kuniyasu, Cancer therapeutic effect of titanium dioxide nanoparticles are associated with oxidative stress and cytosine induction. [online]. [vid. 2023-08-26]
- [32] M. Radetic, Funcitonalization of textile materials with TiO₂ nanoparticles, J. Photochem. Photobiol., C 16 (2013) 62-76. [online]. [vid. 2023-09-10]
- [33] Y. Zhaodan, Application of titanium dioxide nano-particles on textile modification, Open. J. Adv. Mater. Res. 821-822 (2018) 901-905. [online]. [vid. 2023-09-10]
- [34] H.Li, H. Deng, J. Zhao, Performance research of polyester fabric treated by nano titanium, INT. J. Chem. 1 (1) (2009) 57-62[online]. [vid. 2023-09-10]
- [35] M.Rahman, E. Khalil, Effect of titanium dioxide treatment on the properties of 100% cotton knitted fabric, Am. J. Eng. Res. (AJER) 9 (2014) 87-90. [online]. [vid. 2023-09-15]
- [36] D. Saravan, UV protection textile materials, AUTEX Res. J. 7 (1) (2007) 11-18. [online]. [vid. 2023-09-15]

- [37] M.J. Gázquez, J.P. Bolívar, R. Garcia-tenorio, F. Vaca, A review of the production cycle of titanium dioxide pigment, *Mater. Sci. Appl. (MSA)* 5 (7) (2014) 441-458[online]. [vid. 2023-09-15]
- [38] Han, D. K., Park, S.-J., & Lee, K. H. (rok). Antistatic Nanocomposite Fibers Prepared by Electrospinning of Nylon 6/TiO₂ Nanocomposite Fibers. [online]. [vid. 2023-09-18]
- [39] Český lékopis 2017: Tištěná verze (1.-4. díl). (2017). (n.p.): Grada Publishing a.s.. [online]. [vid. 2023-09-18] Dostupné z: https://www.google.cz/books/edition/%C4%8Cesk%C3%BD_1%C3%A9kopis_2017/in1iDwAAQBAJ?hl=cs&gbpv=0
- [40] Holec, P.: Stanovení viskozitně střední molekulové hmotnosti polyethylenglykolu. [Online]. [vid. 2023-010-3]. Dostupné z: <https://elearning.tul.cz/course/view.php?id=14353>
- [40] Viscosity and Important Concepts in Fluid Dynamics. World Technologies. [Online]. [vid. 2023-010-3]. Dostupné z: <https://www.perlego.com/book/1239212/viscosity-and-important-concepts-in-fluid-dynamics-pdf>, [Online]. [vid. 2024-014-2].
- [41] Berry, G. C., “Thermodynamic and conformational properties of polystyrene. II. Intrinsic viscosity studies on dilute solutions of linear polystyrenes,” *J. Chem. Phys.* Dostupné z:<https://doi.org/10.1063/1.184085446>, [Online]. [vid. 2024-014-2].
- [42] Tanford, C. *Physical Chemistry of Macromolecules*. New York: John Wiley & Sons Inc., 1961. 710 s. ISBN 0471844471. Dostupné z: <https://unpa.edu.mx/~aramirez/Physical%20Chemistry%20of%20Macromolecules%20Basic%20Principles%20and%20Issues.pdf>[Online]. [vid. 2024-014-2].
- [43] Mertz, J. (2019). *Introduction to Optical Microscopy* (2nd ed.). Cambridge University Press. [Online]. [vid. 2023-010-3]. Dostupné z: <https://www.perlego.com/book/3545931/introduction-to-optical-microscopy-pdf>
- [44] Keyse, R. (2018). *Introduction to Scanning Transmission Electron Microscopy* (1st ed.). CRC Press. [Online]. [vid. 2023-011-9]. Dostupné z:

<https://www.perlego.com/book/1501327/introduction-to-scanning-transmission-electron-microscopy-pdf>

- [45] Wilson, Cheryl Anne, Parisi, Alfio V. Protection from solar erythemal ultraviolet radiation –simulated wear and laboratory testing. *Textile Research Journal*, 2006, 76(3), 216–225, doi:10.1177/0040517506060907 [Online]. [vid. 2024-010-1]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/200550159_Protection_from_Solar_Erythemal_Ultraviolet_Radiation_-_Simulated_Wear_and_Laboratory_Testing
- [46] Journal of Physics: Conference Series, Volume 596, Tunisia-Japan Symposium: R&D of Energy and Material Sciences for Sustainable Society 28–30 November 2014, Gammarth, Tunisia. [Online]. [vid. 2024-010-1]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/275061871_Optical_properties_of_nanostructured_TiO2_thin_films
- [47] Yin Zhao, Chunzhong Li, Xiuhong Liu, Feng Gu, Haibo Jiang, Wei Shao, Ling Zhang, Ying He, Synthesis and optical properties of TiO₂ nanoparticles, *Materials Letters*, Volume 61, Issue 1, 2007, Pages 79-83, ISSN 0167-577X. [Online]. [vid. 2024-010-1].
- [48] Cuppoletti J., *Nanocomposites and polymers with analytical methods*,. [online]. ISBN: 978-953-307-352-1. [vid. 2023-10-08].
- [49] Gacitua, William. *Polymer Nanocomposites: Synthetic and Natural Fillers a Review*. Maderas:ciencia y tecnologia. 2005, roč. 7, č. 3. [online]. [vid. 2023-10-08].
- [50] Darwish MSA, Mostafa MH, Al-Harbi LM. Polymeric Nanocomposites for Environmental and Industrial Applications. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022; 23(3):1023. [online]. [vid. 2023-10-09]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ijms23031023>
- [51] Mittal, V. (2011). *Nanocomposites: In Situ Synthesis of Polymer-Embedded Nanostructures*. Wiley. [online]. [vid. 2023-10-09].
- [52] Chawla, K. K. (2013). *Composite Materials: Science and Engineering*. Springer New York. ISBN: 9781475729665, 1475729669. [online]. [vid. 2023-10-09].