

Nanostrukturovaný filtrační materiál s minimalizovaným tlakovým odporem pro filtraci vzduchu

Bc. Vojtěch Starostka

Diplomová práce
2022

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav inženýrství polymerů

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Vojtěch Starostka**
Osobní číslo: **T20100**
Studijní program: **N0722A130001 Inženýrství polymerů**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Nanostrukturovaný filtrační materiál s minimalizovaným tlakovým odporem pro filtraci vzduchu.**

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte podrobnou literární rešerši na zadané téma.
2. Zhodnoťte dosavadní stav v oblasti aplikace nanostruktur pro filtraci vzduchu.
3. Navrhněte chemické složení a morfologii nanostruktur s minimálním tlakovým odporem.
4. Připravte vytípané nanostruktury technologií elektrospinningu.
5. Charakterizujte připravené nanostruktury, vyhodnoťte naměřená data – především tlakový odpor a filtrační schopnosti v oblasti zachytu ultrajemných částic.
6. Navrhněte možnosti konkrétních aplikací u připravených filtrů a diskutujte přednosti nově připravených materiálů.
7. V závěrech sumarizujte výsledky prací.

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

William C. Hinds – Aerosol Technology, John Wiley Sons, Inc., NY 10158-0012.

Ji-Huan He, Yong Liu, Lu-Feng Mo, Yu-Qin Wan and Lan Xu – Electrospun Nanofibers and Their Applications.

Martin Zatloukal – Novel Trends in Rheology III – VII, AIP Conference Proceedings.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Dušan Kimmer, CSc.**
Centrum polymerních systémů

Datum zadání diplomové práce: **1. února 2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2022**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

Ing. Jana Navrátilová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 1. dubna 2022

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato diplomová práce si klade za cíl připravit nanostrukturovaný filtrační materiál s minimalizovaným tlakovým odporem pro filtraci vzduchu a vysokou filtrační účinností. V rámci řešení bylo připraveno několik roztoků z kyseliny polyléčné, polyurethanu a polybutylen sukcinátu, které byly zvlákňovány v elektrostatickém poli a nanovlákná byla dále analyzována. Jednotlivé průměry vláken byly stanoveny pomocí digitálního programu pro měření vzdáleností ze snímků z rastrovacího elektronového mikroskopu. Následně byla měřena filtrační účinnost a tlakový odpor vzorků. V neposlední řadě byla stanovena také pórovitost a vlastnosti zvlákňovaných roztoků. Bylo potvrzeno, že přítomnost nanovláken s menším průměrem vláken v nanostrukturu zvyšuje filtrační účinnost a zároveň snižuje tlakovou ztrátu. Bylo zjištěno, že objemové překážky v nanostrukturu (globulární defekty a beads) sice pozitivně zvyšují filtrační účinnost, ale i negativně zvyšují tlakový odpor. Vyšší hodnoty středního průměru pórů zlepšují (snižují) tlakový odpor. Výsledná hodnota filtrační účinnosti je pak dána kombinací vlivu jednotlivých proměnných. Vybrané nanostruktury byly porovnány s komerčními filtračními materiály z hlediska filtrační účinnosti a tlakového odporu.

Klíčová slova: nanovlákná, elektrospinning, filtrační účinnost, tlakový odpor, průměr nanovláken, střední průměr pórů

ABSTRACT

This diploma thesis aims to prepare a nanostructured filter material with minimized pressure drop and high filtration efficiency for air filtration. As part of the study, several solutions of polylactic acid, polyurethane and polybutylene succinate were prepared and were spun in electrostatic field and the nanofibers further analyzed. Individual fiber diameters were measured using the digital program for measurement of small dimensions from scanning electron microscope images. Subsequently, the filtration efficiency and pressure drop of the electrospun solutions were measured. Last but not least, the porosity and properties of the fiber forming solutions were analyzed. It was confirmed that the presence of nanofibers with

a smaller fiber diameter in the nanostructure increases the filtration efficiency and at the same time reduces the pressure drop. It was found that presence of volume barriers in the nanostructure (globular defects and beads) positively increase the filtration efficiency but they also negatively increase the pressure drop. Higher values of the mean pore diameter improve (decreases) pressure drop. The resulting value of filtration efficiency is given by a combination of the influence of individual variables. The prepared nanostructures were compared with commercial filter materials in terms of filtration efficiency and pressure drop.

Keywords: nanofibers, electrospinning, filtration efficiency, pressure drop, fiber diameter, mean pore diameter

Tímto bych velmi rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Dušanovi Kimmerovi, CSc. za jeho odborné vedení, cenné poznámky a možnost častých konzultací, které mi pomohly při zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Lence Lovecké, Ph.D. za její pomoc při práci v laboratoři. V neposlední řadě patří dík také Ing. Zuzaně Krchňáčkové, Ph.D. a Ing. Ivo Vincentovi, CSc za jejich ochotu a čas.

Poděkování patří také mé rodině za velkou podporu, kterou mi během studia věnovala.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 NANOVLÁKNA	13
1.1 HISTORIE VÝROBY NANOVLÁKEN.....	14
1.2 MORFOLOGIE NANOVLÁKEN	15
1.2.1 Korálková struktura	15
1.2.2 Vrásčitá struktura.....	16
1.2.3 Porézní struktura.....	17
1.2.4 Struktura jádro-slupka.....	18
1.2.5 Dutá struktura.....	19
1.2.6 Pásková struktura.....	20
1.2.7 Rozvětvená struktura	21
1.2.8 Síťová struktura	22
1.3 VYBRANÉ POLYMERY VYUŽÍVÁNÉ PRO VÝROBU VLÁKEN A JEJICH CHARAKTERISTIKA	23
1.3.1 Polyurethan	23
1.3.2 Kyselina polymléčná	23
1.3.3 Polybutylen sukcinát.....	24
2 ELEKTROSTATICKÉ ZVLÁKŇOVÁNÍ	25
2.1 PRINCIP ELEKTROSTATICKEHO ZVLÁKŇOVÁNÍ.....	25
2.1.1 Iniciace paprsku.....	26
2.1.2 Prodlužování paprsku	26
2.1.3 Tvorba nanovláken	27
2.2 DALŠÍ ZPŮSOBY VÝROBY	27
2.2.1 Samoskládání	27
2.2.2 Fázová separace.....	27
2.2.3 Mezifázová polymerace	28
2.2.4 Rychle iniciovaná polymerace	28
2.2.5 Šablonová syntéza	29
2.2.6 Růst pára-kapalina-pevná látka	29
2.2.7 Hydrotermální syntéza.....	30
2.2.8 Výhody a nevýhody metod	31
3 FILTRACE VZDUCHU	32
3.1 MAKROSKOPICKÉ VLASTNOSTI FILTRŮ	32
3.2 ÚČINNOST JEDNOHO VLÁKNA	33
3.3 MECHANISMY ZÁCHYTU.....	33
3.3.1 Zachycení.....	33
3.3.2 Impakce.....	34
3.3.3 Difuze.....	35
3.3.4 Gravitační usazování	35

3.3.5	Elektrostatické interakce	36
3.4	FILTRAČNÍ ÚČINNOST	36
3.5	FAKTOR KVALITY	37
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	38
4	POUŽITÉ CHEMIKÁLIE, POMŮCKY A PŘÍSTROJE	39
4.1	POUŽITÉ CHEMIKÁLIE	39
4.2	PŘÍSTROJOVÉ VYBAVENÍ.....	39
5	METODIKA.....	40
5.1	VÝROBA A TESTOVÁNÍ NANOVLÁKEN	40
5.1.1	Příprava roztoku PU	41
5.1.2	Příprava roztoku PLA	41
5.1.3	Příprava roztoku PBS	41
5.1.4	Příprava vzorku PBS/PU.....	41
5.2	TESTOVÁNÍ NANOVLÁKNITÝCH STRUKTUR.....	41
5.2.1	Stanovení plošné hmotnosti	42
5.2.2	Měření elektrické vodivosti	42
5.2.3	Měření viskozity roztoků	42
5.2.4	Rastrovací elektronová mikroskopie	43
5.2.5	Stanovení průměru vláken	43
5.2.6	Stanovení pórovitosti	43
5.2.7	Měření filtrační účinnosti.....	44
6	VÝSLEDKY A DISKUZE	45
6.1	VÝROBA NANOVLÁKEN	45
6.1.1	Výroba nanovláken z PU	45
6.1.2	Výroba nanovláken z PLA	46
6.1.3	Výroba nanovláken z PBS	46
6.1.4	Výroba vláken z PBS/PU	47
6.2	CHARAKTERIZACE FILTRAČNÍCH MATERIÁLŮ	47
6.2.1	Filtrační vlastnosti podkladového substrátu PP 30.....	47
6.2.2	Charakterizace PU nanostruktur.....	49
6.2.3	Charakterizace PLA nanostruktur	58
6.2.4	Charakterizace PBS nanostruktur.....	64
6.2.5	Charakterizace PBS/PU nanostruktur.....	69
6.2.6	Filtrační vlastnosti PU, PLA, PBS a PU/PBS nanostruktur.....	74
6.3	MORFOLOGIE NANOSTRUKTUR	75
6.4	PLA STRUKTURY S NÍZKOU TLAKOVOU ZTRÁTOU.....	76
6.4.1	Kombinace PLA nanostruktur.....	80
6.5	NEJLEPŠÍ PŘIPRAVENÉ MATERIÁLY	81
6.6	SROVNÁNÍ FILTRAČNÍCH VLASTNOSTÍ PŘIPRAVENÝCH NANOSTRUKTUR S KOMERČNÍMI MATERIÁLY	81
ZÁVĚR	85

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	86
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	92
SEZNAM OBRÁZKŮ	93
SEZNAM TABULEK	96
SEZNAM PŘÍLOH	97

ÚVOD

V současné době přitahuje celosvětovou pozornost otázka znečištění ovzduší způsobeného částicemi (PM – particulate matter), které představují rostoucí hrozbu pro veřejné zdraví a atmosférické prostředí. Částice, které obsahují anorganické a organické složky, jsou nerozložitelné malé částice a kapičky suspendované v atmosféře. Na základě velikosti částic se obecně dělí na $PM_{0,3}$, $PM_{0,5}$, $PM_{2,5}$ a PM_{10} , s odkazem na velikosti částic menší než 0,3, 0,5, 2,5 a 10 μm . Když jsou lidé chronicky vystaveni prostředí s vysokou koncentrací polutantů, zejména malým velikostem částic, způsobí to nenapravitelné poškození lidského zdraví. Ročně se odhaduje, že téměř 4 miliony lidí přijdou o život kvůli znečištění ovzduší. [1] Proto je důležité věnovat se výzkumu vysoce účinných vzduchových filtrů.

Díky velkému specifickému povrchu, dobré vnitřní konektivité a kontrolovatelné morfologii se elektrospínované nanovláknité membrány staly kandidáty pro přípravu vysoce účinných vzduchových filtrů. Obecně platí, že u nanovláken hraje hlavní roli zachycovací efekt při odstraňování částic cílené velikosti. Úpravou morfologie vláken je realizován nízký tlakový odpor a vysoká filtrační účinnost.

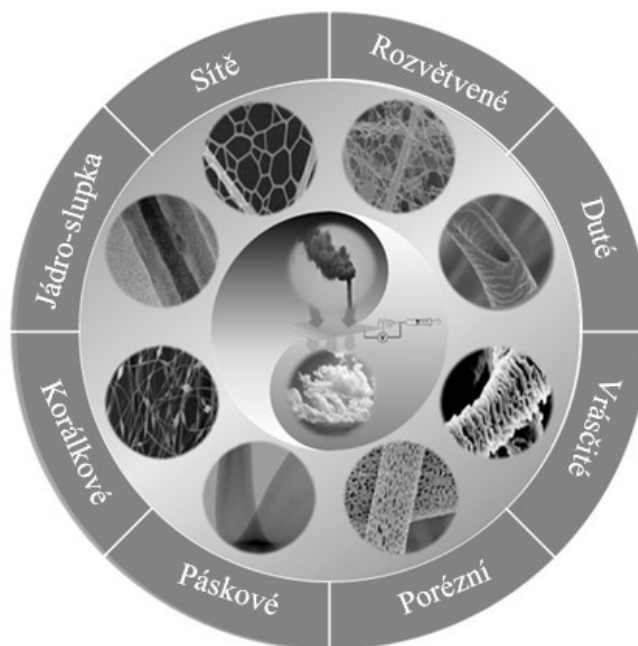
Nanovláknité struktury jsou vhodným materiálem pro přípravu filtrů s vysokou účinností záchytu submikronových částic při filtraci vzduchu. Cílem výzkumných prací je popis vlivu prostorového uspořádání nanostruktur na filtrační vlastnosti – filtrační účinnost a tlakovou ztrátu. Pro charakterizaci nanostruktur bylo využito rastrovací elektronové mikroskopie, stanovení průměrů nanovláken a porovitosti nanostruktur. Současně jsou porovnávány a vyhodnocovány vlivy průměrů nanovláken a středního průměru pórů v nanostrukturách na vlastnosti filtračních materiálů. Zvláštní pozornost je věnována přítomnosti objemových defektů kulovitého a válcovitého (beads) tvaru v nanostrukturách na jejich výsledné filtrační vlastnosti.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 NANOVLÁKNA

Nanovlákná byla objevena jako fascinující jednorozměrné (1D) nanomateriály pro širokou škálu výzkumných a komerčních aplikací. Nanovlákná vykazují několik zajímavých vlastností, jako je průměr 1000x menší než průměr lidského vlasu, velký povrch s laditelnou porézností, 3D morfologií, flexibilitu, možnost povrchové funkcionalizace a lepší mechanické vlastnosti v přepočtu na jejich průměr vláken (tj. především tuhost a pevnost v tahu), než kterákoliv jiná běžně používaná vlákna. Významný dopad nanovláknité technologie je způsoben dostupností široké škály materiálů, které lze použít pro výrobu nanovláken, včetně přírodních a syntetických polymerů, kovů a oxidů kovů, uhlíkových a kompozitních nanomateriálů. Kromě toho mohou být povrchové a objemové vlastnosti nanovláken modifikovány tak, aby nesly různé funkce, což vede k různým fyzikálním vlastnostem a potenciálním aplikacím.

Jednotná, mezinárodně uznávaná definice nanomateriálů neexistuje. Ve skutečnosti jsou často označovány podle svého charakteristického tvaru jako nanočástice, nanotrubičky, nanovlákná, nanodrátky nebo nanotyčinky. Podle British Standards Institution je nanomateriál materiál s jakýmkoliv vnějším rozměrem v nanoměřítku, nebo s vnitřní strukturou či povrchovou strukturou v nanoměřítku. V nanočásticích jsou všechny tři vnější rozměry v nanoměřítku. Nanovlákná mají dva podobné vnější rozměry (průměr nanovlákná = X nebo Y) v nanoměřítku, zatímco třetí rozměr (délka nanovlákná = Z) je výrazně větší. Existuje mnoho typů nanovláken a jsou kategorizovány na základě jejich původu (přírodní a umělá nanovlákná), složení (organická, anorganická, uhlíková a kompozitní nanovlákná), struktury (pevná, porézní, neporézní, dutá a jádro-slupka) (Obrázek 1) a tuhosti (pružná a tuhá). [2]



Obrázek 1: Různé morfologie nanovláken [3]

Vzhledem k jejich vysokému poměru stran a schopnosti tvořit 3D síťové struktury jsou nanovlákná předurčena pro různé biomedicínské aplikace, jako je doprava léčiv, hojení ran a tkáňové inženýrství. Na druhou stranu většina nanočástic menších než 100 nm může proniknout do lidských buněk (na rozdíl od nanovláken) a ničit buněčné komponenty a způsobit buněčnou lýzu. Povrchová textura nanovláken (poréznost a drsnost povrchu), složení (povrchová a objemová struktura), síťová struktura (náhodná nebo uspořádaná) a molekulární orientace však musí být kontrolovány, aby se zlepšila jejich biologická aktivita. [2]

Nanovlákná se v současné době vyrábí převážně procesem elektrostatického zvlákňování - elektrosponingem. Tato metoda byla použita i v praktické části diplomové práce a bude popsána níže.

1.1 Historie výroby nanovláken

O elektrostatickém zvlákňování se psalo již v 17. století. William Gilbert vysvětlil deformaci a vyloučení kapky kapaliny poté, co se přibližoval ke kapalině kouskem elektricky nabitého jantaru. V roce 1887 Charles Vernon Boys zkonstruoval přístroj pro elektrostatické zvlákňování. Zjistil, že vlákna lze získat z různých tekutých materiálů jako je například včelí vosk, gutaperča, pečtní vosk a dalších. Elektrostatické zvlákňování si nechal poprvé patentovat John F. Cooley v roce 1902. Od té doby se mnoho vědeckých skupin začalo elektrostatickým zvlákňováním zabývat. Mezi lety 1930-1944 bylo zažádáno Antonem

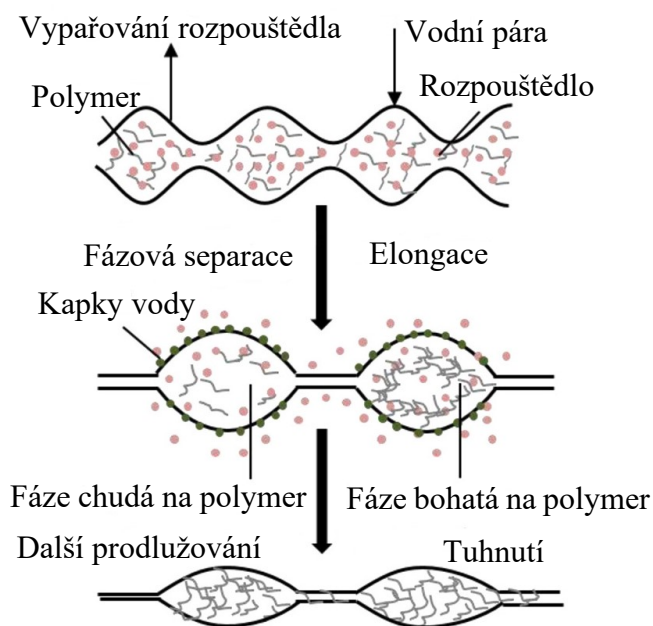
Formhalsem až o 22 patentů v tomto odvětví. Za zmínku stojí sir Geoffrey Ingram Taylor, který popsal matematickým modelem tvar deformačního kuželu, který je formován kapkou kapaliny pod aplikovaným elektrickým polem. Díky tomuto objevu se dnes deformační kužel vytvářený při elektrospinningu nazývá Taylorův kužel. S rozvojem nanotechnologií bylo na počátku 90. let zjištěno, že řadu organických polymerů lze elektrostaticky zvláknovat do nanovláken. Od roku 1995 se teoretický a aplikační výzkum elektrostatického zvláknování každým rokem exponenciálně zvyšuje. [4,5]

1.2 Morfologie nanovláken

Ideální vzduchový filtr by měl mít velmi jemný průměr vlákna s vysokou porézností, která zajišťuje nejen efektivní zachycení částic, ale také usnadňuje průchod vzduchu. Vědci se spíše zaměřují na zlepšení účinnosti filtrace vzduchu úpravou tloušťky nanovláken, přičemž ignorují efektivnější způsob úpravy povrchové struktury nanovláken. V této části jsou uvedeny různé morfologie nanovláken. [3,6]

1.2.1 Korálková struktura

Kvůli tokové nestabilitě se paprsek zředěného roztoku polymeru v procesu elektrostatického zvláknování rozbije a dochází k relativnímu skluzu mezi řetězcí polymerních molekul, což má za následek vytvoření struktury podobné korálkům na povrchu vlákna. Kromě toho je průměr koráleků výrazně větší než průměr vláken. Tvorba korálkové struktury na povrchu vlákna ovlivňuje tlakovou ztrátu, ale může také zvětšit měrný povrch vlákna ve filtračních membránách vzduchu. Existuje však jen málo studií o účincích korálkových struktur na tloušťku a účinnost filtračních membrán vzduchu. Kromě toho je třeba dále studovat vliv polohy naskládání koráleků na účinnost filtračních membrán vzduchu ve dvouvrstvých filtrech.



Obrázek 2: Tvorba koráلكové struktury [3]

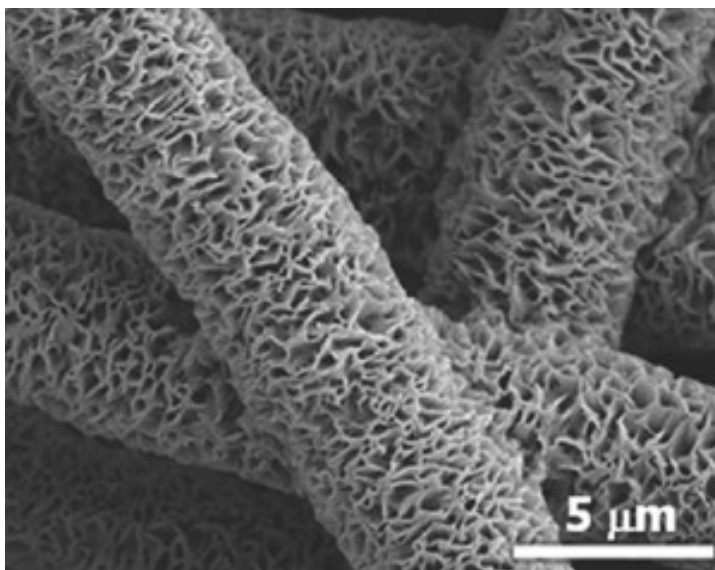
Jak je znázorněno na obrázku 2, během elektrostatického zvlákňování se polymerní paprsky zpočátku skládají ze směsi polymerů a rozpouštědel rozstříkovaných do vzduchu. Kvůli termodynamické nestabilitě vede rychlé odpařování rozpouštědla k rychlému poklesu povrchové teploty, což má za následek separaci fází a tvorbu bohatých a chudých polymerních fází. Navíc během procesu chlazení vodní pára ulpívá na povrchu paprsku a vytváří vodní kapky. Když paprsek polymeru vstoupí do fáze prodlužování a tuhnutí, rozpouštědlo na povrchu se odpaří. Fáze bohatá na polymer ztuhne a vytvoří matici vlákn a fáze chudá na polymer vytvoří póry.

S ohledem na koráلكovou strukturu polymerního paprsku a jeho vysokou tažnost v procesu elektrostatického zvlákňování je kapilární spojení mezi koráلكy rychle nataženo do velmi jemného paprsku se současně celým natahováním paprsku, což podporuje kolaps pórů na povrchu vlákna. Proces tvorby koráلكové struktury takto přispívá k tvorbě nanopórů. [7,8]

1.2.2 Vrásčítá struktura

V posledních letech prokázala vrásčítá nanovlákn obrovský potenciál v sorpčních a separačních aplikacích. Vrásčítá struktura má nejen velmi velký povrch, ale také zvyšuje průměrnou vzdálenost mezi vlákny, což má za následek vyšší účinnost filtrace částic ve srovnání s obyčejnými nanovlákn. V současnosti existují dva druhy metod povrchové modifikace pro konstrukci vrásčité povrchové struktury: Fyzikální (dopování anorganickými částicemi, tepelné zpracování a plazmové ošetření) a chemické (žihání v parách rozpouštědel a mokré chemické srážení).

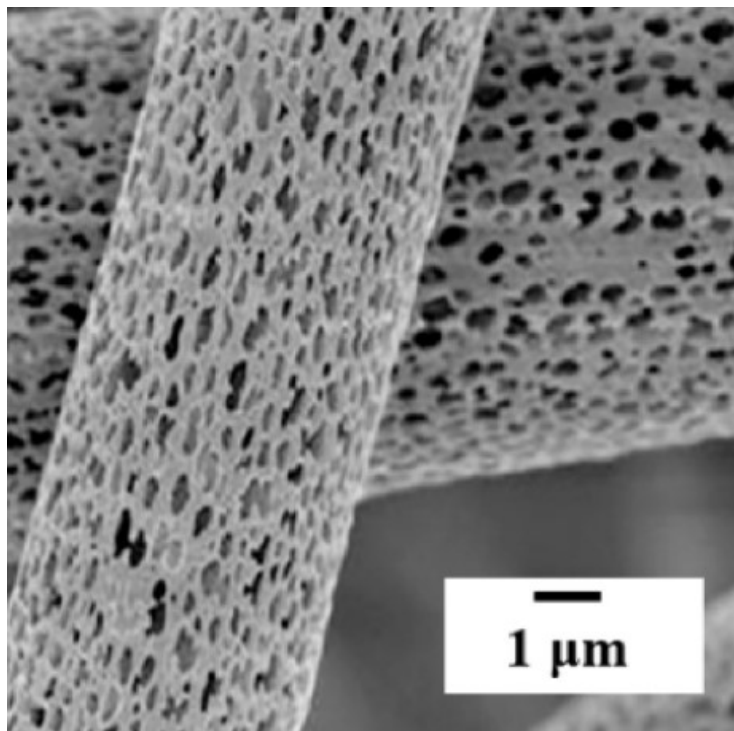
Vrásčitá povrchová struktura a vysoce porézní struktura pórů poskytují nízký pokles tlaku při zachování vysoké filtrační účinnosti. Ve srovnání s komerčními filtračními membránami vzduchu může vrásčitý povrch a nanopórovitá struktura zlepšit výkon filtrace vzduchu. Kromě částic mohou vrásčitě strukturovaná vlákna s vysokým specifickým povrchem také zachytit plyny, jako je oxid uhličitý. Ačkoli by vrásčitá vlákna mohla výrazně zlepšit účinnost filtrace zvětšením kontaktní plochy s prouděním vzduchu, stále existuje několik problémů, jako je velký průměr vlákna nebo nerovnoměrná objemová hustota. Navíc opakovatelnost filtrace je u zvrásněné vláknité membrány špatná, což je způsobeno skutečností, že zvrásněná vláknitá membrána je náchylná k zablokování a hromadění částic kvůli své komplikované struktuře a menšímu prostoru mezi vráskami než u aerosolových agregátů. [9,10]



Obrázek 3: Vrásčitá struktura [11]

1.2.3 Porézní struktura

Na rozdíl od tradičních tuhých porézních struktur je porézní struktura nanovláken dynamickým systémem, který může měnit velikost a strukturu pórů úpravou parametrů procesu. Různé chemické (rozpuštědlové ošetření a separaci) a fyzikální (laserové ozařování) metody byly použity pro přípravu porézních vláken. Nanovláknata připravená elektrostatickým zvlákňováním s porézní strukturou byla použita v mnoha aplikacích. [12,13]



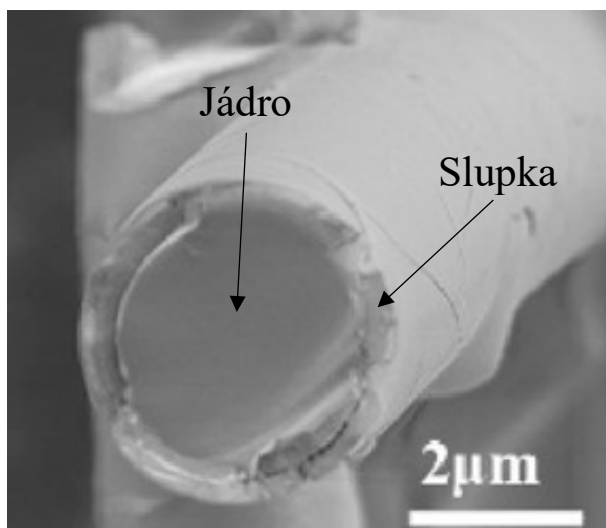
Obrázek 4: Porézní struktura [14]

1.2.4 Struktura jádro-slupka

Nanovlákná s jádrem a slupkou přitahují velkou pozornost díky svým vynikajícím vlastnostem a potenciálním aplikacím. Nanovlákná s jádrem a slupkou mají široké vyhlídky uplatnění v oblasti řízeného uvolňování léčiv, tkáňového inženýrství, superkondenzátorech, adsorpčních materiálech a filtracích. Polymerní nanovlákná, která se obtížně zpracovávají, lze vyrábět dodatečným zpracováním vláken jádro-slupka. Membrány z vláken se strukturou jádro-slupka pro vnitřní filtraci vzduchu jsou v hledáčku výzkumných skupin pro filtrace, adsorpce a katalýzy. Jen málo studií se však zaměřilo na strukturu membrán. K vyřešení tohoto problému začalo mnoho výzkumníků studovat vliv vláken se strukturou jádra a obalu na účinnost filtrace. Úspěšná příprava takového materiálu poskytuje novou cestu pro návrh a vývoj materiálů pro filtraci vzduchu s vysokou účinností. [15]

Materiály pro vybrané průmyslové filtrace prachu se mohou snadno vznítit a explodovat. Více než 70 % prachu v některých průmyslových odvětvích může být hořlavých, hořlavý prach nahromaděný na filtru se pak snadno vznítí plamenem nebo elektrostatickým výbojem. Aby se tomuto nebezpečí vyhnuli, mohou být využita multifunkční nanovlákná se strukturou jádro-slupka, která může dosahovat vysoké filtrační účinnosti při nízké tlakové ztrátě, ale také výrazně zlepšit požární odolnost materiálu. Protože většina výzkumu vláken se strukturou jádro-slupka je připravována stále jen v laboratorním měřítku a nemůže být

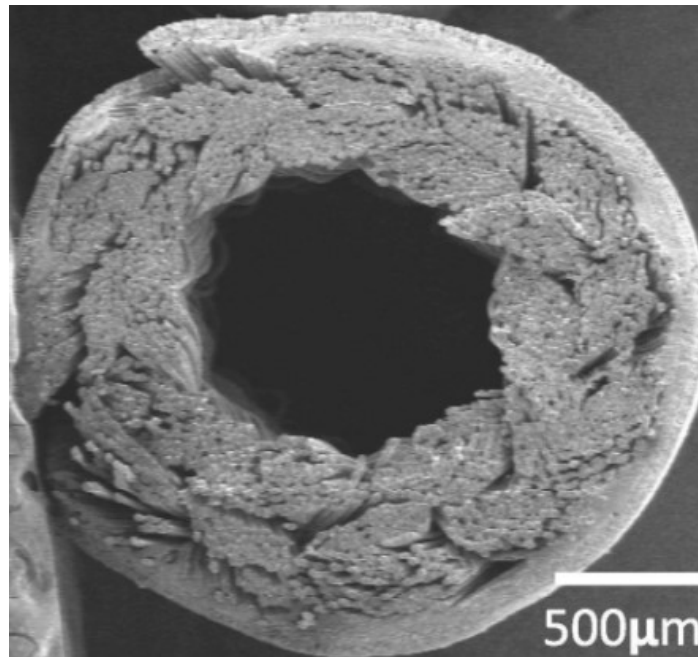
industrializována, relativně nízká produktivita omezila jejich široké použití. Ačkoli většina vláken struktury jádro-slupka je vybavena různými funkcemi, jako je zpomalení hoření, polární adsorpce, uvolňování látek atd., stále trpí nevýhodou špatného výkonu při filtraci vzduchu. [16]



Obrázek 5: Jádro-slupka struktura [17]

1.2.5 Dutá struktura

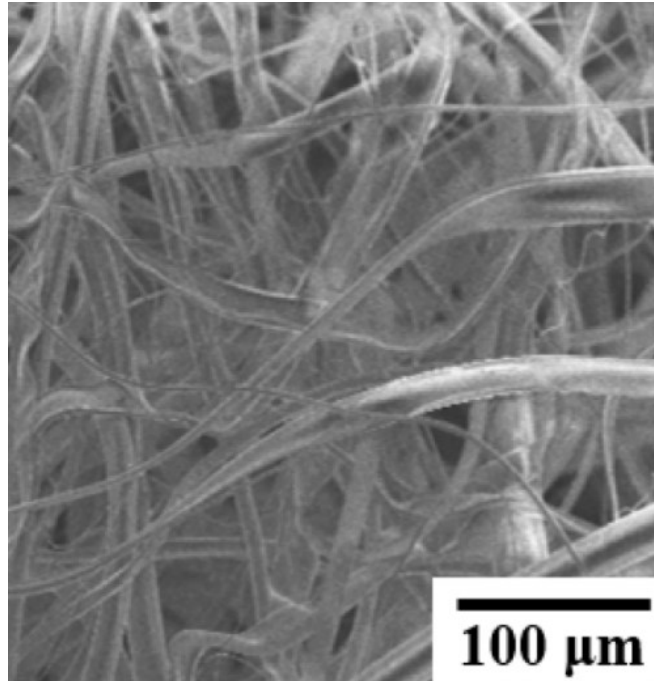
Vzhledem k velkému povrchu a funkci izolace uvnitř i vně, elektrostatická vlákna s dutou strukturou přitahují stále větší pozornost v různých oblastech, jako je senzor, nosič katalyzátoru, skladování plynu, sběr energie, uvolňování léčiv, separace oleje a vody, filtrace vzduchu a další. Koaxiální elektrostatické zvlákňování je běžnou metodou přípravy dutých vláken. Existují dva hlavní způsoby přípravy dutých vláken koaxiálním elektrostatickým zvlákňováním, a to selektivním rozpouštěním nebo tepelným rozkladem. Doposud se pomocí technologie elektrostatického zvlákňování vyráběla řada dutých nanovláken s polymerní maticí, jako je polyethersulfon, polyvinylidenfluorid, polypropylen, polyvinylidenfluorid, polyetherimid. V porovnání se strukturou jádro-slupka je vlákno s dutou strukturou vhodnější pro filtraci vzduchu, protože má vyšší poréznost a nižší hmotnost, což výrazně zlepšuje účinnost filtrace ultra jemných částic. [18,19]



Obrázek 6: Dutá struktura [20]

1.2.6 Pásková struktura

Tlaková ztráta vláknitých membrán se bude s prodlužováním doby filtrace zvyšovat kvůli postupnému zanášení. Proto je zajímavé aplikovat nanovláknitou membránu s vhodnou strukturou pro zajištění nízké tlakové ztráty vzduchového filtru. Byla připravena struktura obsahující pásková vlákna a ultra jemná vlákna pro tenké filtry, aby se snížil odpor proudění vzduchu. Struktury s páskovými vlákny jsou považovány za jedny z ideálních materiálů pro přípravu vzduchových filtrů s dobrým filtračním výkonem díky jedinečné formě tkaniny. Porézní struktura vzduchových filtrů je zde řízena elektrostatickým zvlákňováním proteinového roztoku za vzniku páskových vláken se samoohybovým chováním. Samoohybové chování vláken z kukuřičného proteinu dodává membráně nadýchanou strukturu a dobrou elasticitu. Načechraná struktura dokáže výrazně snížit tlakovou ztrátu při filtraci a tvar pásku také výrazně zlepšuje schopnost zachytit zejména malé částice. Přestože jsou tyto nové vzduchové filtry z páskových vláken účinnější a mají nižší tlakovou ztrátu, jejich výrobní proces je drahý a složitý a je obtížné vyvážit účinnost filtrace a tlakovou ztrátu. [21,22,23]

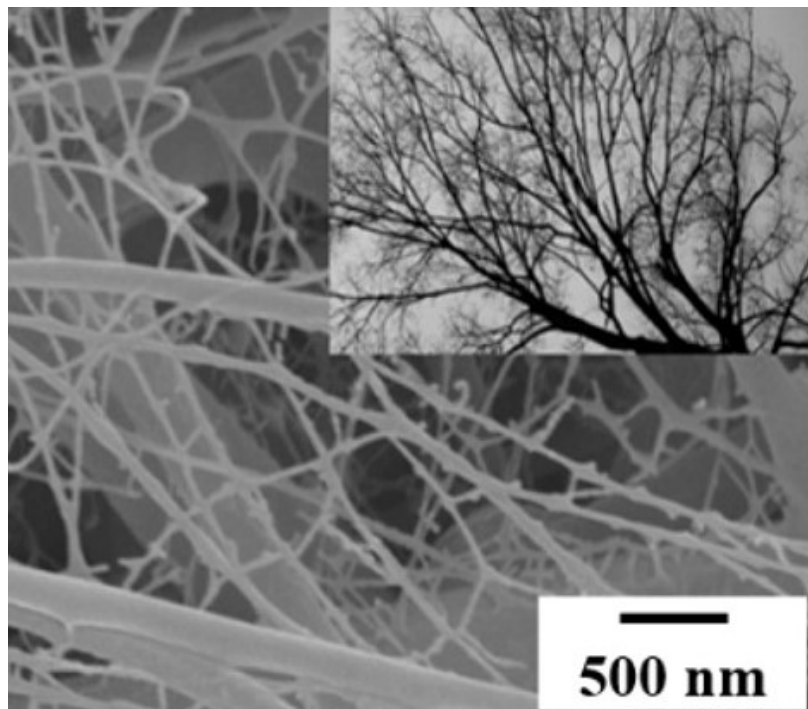


Obrázek 7: Pásková struktura [24]

1.2.7 Rozvětvená struktura

Kromě výše uvedeného je zajímavá také rozvětvená struktura nanovláken. Jak název napovídá, vláknité membrány jsou složeny z kmenových vláken a vláken větví. Tlustá kmenová vlákna fungují jako podpora kostry, která může zlepšit mechanické vlastnosti, a tenká vlákna větví fungují jako spojovací podpěry, které mohou zvětšit poměr povrch/objem.

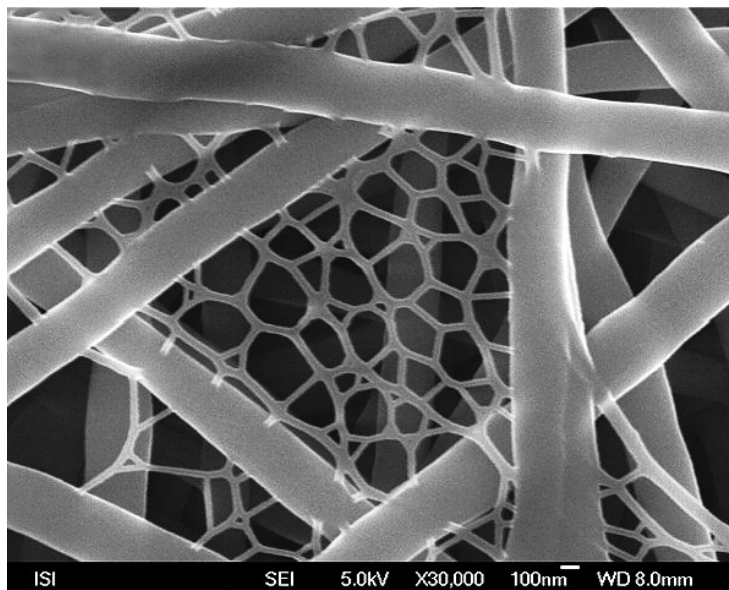
Použití rozvětvených vláken na filtraci vzduchu může nejen udržet vysokou účinnost filtrace, ale také udržet nízkou tlakovou ztrátu díky vysoké poréznosti. Proto rozvětvené elektrostaticky zvlákněvané membrány se supramolekulárními vlákny poskytují nový nápad pro vývoj nových struktur s jedinečnou morfologií a aplikacemi ve filtraci vzduchu. [25,26]



Obrázek 8: Rozvětvená struktura v porovnání se stromem [27]

1.2.8 Síťová struktura

Nanosítě jsou inspirovány přírodou a byly vyvinuty elektrostatickým zvlákňováním vysoce vodivých hydrofilních polymerních roztoků. Na rozdíl od 3D nanovláknité geometrické struktury tyto 2D nanosítě vykazují pravidelnější distribuci pórů v rozmezí od několika nanometrů do stovek nanometrů. Ačkoli výroba nanovláknitých membrán s nanosítovanými strukturami je účinná při snižování velikosti pórů povrchu membrány, stále existují nevyřešené problémy, které brání jejich komerčním aplikacím. Například je obtížné dosáhnout rovnoměrného pokrytí nanosítí po povrchu nebo uvnitř membrány a získat tak nedefektní membránu s malou velikostí pórů a úzkou distribucí velikosti pórů. Vznik PU nanosítí (s průměry vláken 20 nm – 40 nm) mezi PU nanovláknky (s průměry nanovláken většími než 200 nm) byl popsán již v roce 2008. [28]



Obrázek 9: Síťová struktura [29]

1.3 Vybrané polymery využívané pro výrobu vláken a jejich charakteristika

1.3.1 Polyurethan

Polyurethany (PU) jsou vysoce výkonné polyadukty a připravují se střídáním tuhých a pružných segmentů. Je to materiál, který může být semikrystalickým termoplastem, elastomerem i reaktoplastem. Finální polyadukt, používaný v této práci se tvoří ve dvou samostatných krocích. V prvním kroku diisokyanát a polyol spolu reagují za vzniku meziprojektu se střední molekulovou hmotností 2500, který se nazývá prepolymer a je to obecně hustá viskózní kapalina. Poté se další reakcí s diolovým nebo diaminovým prodlužovačem řetězce převede na konečný vysokomolekulární polyadukt. Změny ve vlastnostech použitých polyolů, diisokyanátů a prodlužovačů řetězců, aplikace katalyzátorů nebo jiných přísad umožňují syntetizovat plasty se širokou paletou vlastností. Obecně jsou vlastnosti polyurethanů velmi zajímavé. Patří mezi ně odolnost proti chemikáliím, oděru a poškrábání, stejně jako pružnost a houževnatost. [30,31,37]

1.3.2 Kyselina polymléčná

Kyselina polymléčná (PLA) je jedním z předních zástupců biopolymerů, které prokázaly konkurenční mechanické vlastnosti jako jejich protějšky získávané z ropy. PLA má jako monomerní jednotku kyselinu mléčnou, což je alifatická kyselina, která se obvykle získává fermentací cukrové třtiny, brambor a kukuřice. PLA je nejoblíbenější biopolymer používaný

v odvětví balení a vyrobí se ho přibližně 140 000 tun ročně. Má dobré mechanické vlastnosti a tepelnou odolnost. Mnoho studií prokázalo, že PLA má malou rozpustnost v široké škále rozpouštědel. Mechanické vlastnosti čistého PLA lze měnit změnou stereoizomerie, krystalinity, molekulové hmotnosti a dalších vlastností. Pevnost v tahu je přibližně 3500 MPa. Teplota tání tohoto materiálu je v rozmezí 150 °C – 180 °C. Přitom teplota skelného přechodu je v rozmezí 40 °C – 70 °C. Další výhodou jsou bariérové vlastnosti materiálu. Tento faktor zahrnuje propustnost pro vlhkost a molekuly plynu. [32,33,35]

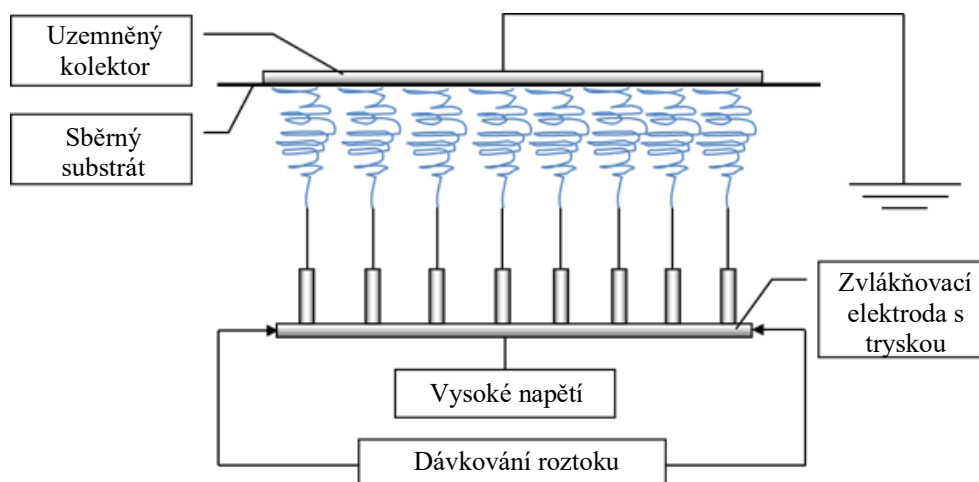
1.3.3 Polybutylen sukcinát

Polybutylen sukcinát (PBS) je biologicky odbouratelný polymer a kompostovatelný alifatický polyester, který se vyrábí z kyseliny jantarové a 1,4-butandiolu. Kyselina jantarová je dikarboxylová kyselina, která má molekulární vzorec sloučeniny $C_4H_6O_4$. Kyselina jantarová se získává hlavně z chemických ropných procesů, ve kterých se jako výchozí materiál používá zkapalněný ropný plyn nebo ropný olej. V současnosti se kyselina jantarová vyrábí většinou chemickým procesem, jako je hydrogenace za použití anhydridu kyseliny maleinové. Kromě výše zmíněných postupů může být kyselina jantarová produkována také fermentací obnovitelných surovin jako je celulóza, škrob nebo glukóza pomocí mikroorganismů. PBS je bílá krystalická látka s teplotou tání 90 °C – 120 °C, teplotou skelného přechodu v rozmezí -45 °C až -10 °C a hustotou asi 1,25 g/cm³. PBS má mechanické vlastnosti podobné polyethylenu a je tvrdší než kyselina polymléčná. Youngův modul PBS je v rozmezí 300-500 MPa, v závislosti na stupni krystalinity. [32,34,35]

2 ELEKTROSTATICKÉ ZVLÁKŇOVÁNÍ

Elektrostatické zvlákňování je technika využívající elektrostatické síly k výrobě nanovláken. Když se na kapku roztoku přivede vysoké napětí, molekuly roztoku se nabijí a dochází k elektrostatickému odpuzování, které působí proti povrchovému napětí kapky. Když se vysoké napětí zvýší na kritický bod, z povrchu vytryskne proud roztoku. Jak se rozpouštědlo odpařuje, další natahování nabitého paprsku pod elektrostatickými silami jej převede do stádia ohybové nestability. Prodlužování a ztenčování nabitého paprsku v důsledku této nestability vede k tvorbě souvislých vláken s průměry v nanoměřítku.

Obvykle se zařízení (obrázek 10) skládá ze zdroje napětí, dávkovače, trysky a uzemněného kolektoru. Na špičku trysky, kterou proudí roztok polymeru s viskozitou v rozmezí 0,2 Pa.s - 4 Pa.s, je aplikováno vysoké elektrické napětí > 10 kV. Pro sběr vláken se používá sběrný substrát pohybující se před uzemněným kolektorem. [36]



Obrázek 10: Zařízení na výrobu nanovláken pomocí elektrostatického zvlákňování [29]

2.1 Princip elektrostatického zvlákňování

Celý proces elektrostatického zvlákňování se skládá ze tří fází: Iniciací paprsku, prodlužování paprsku a tvorba nanovláken. Iniciací paprsku začíná po vytvoření Taylorova kužele. Ke vzniku Taylorova kužele dochází, když elektrické pole dokáže překonat povrchové napětí roztoku polymeru a tím jej prodloužit. Existuje prahová mez napětí, během kterého se tvar Taylorova kužele postupně mění. Působení příliš vysokého napětí zapříčiní, že kapka ustoupí do trysky, zatímco při použití příliš nízkého napětí nedojde k vytvoření Taylorova kužele. Paprsek putuje k uzemněnému nebo opačně nabitému kolektoru

z Taylorova kužele zpočátku lineární cestou. Úhel vytvořeného Taylorova kužele se mění v závislosti na parametrech použitých pro elektrostatické zvlákňování. [36]

2.1.1 Iniciace paprsku

Proces iniciace paprsku začíná, když je použité elektrické pole nad kritickou hodnotou napětí. Kritická hodnota napětí se odvíjí od povrchového napětí roztoku polymeru a jeho průtoku. Hustota náboje je nejvyšší na špičce Taylorova kužele. Jakmile je paprsek vypuzen pohybuje se v počátku po lineární trajektorii. [38]

2.1.2 Prodlužování paprsku

Po proudění lineární trajektorií paprsek podléhá chaotickému proudění, které je způsobeno axiálně nesymetrickou silou. Tato síla způsobí, že se proud natahuje a vytváří spirálu, jejíž průměr se stále zvětšuje.

V kroku prodlužování paprsku hraje roli několik parametrů. Podmínky prostředí, jako je vlhkost a teplota, elektrostatické síly, které jsou závislé na použitém elektrickém poli a permitivitě kapaliny, rychlost odpařování rozpouštědla a viskoelastická odezva kapaliny jsou některé z parametrů, které ovlivňují proces.

Zrychlení paprsku směrem ke kolektoru je úměrné elektrickému poli a průtoku. Pro kontinuální elektrostatické zvlákňování je nutný stálý proud. Pokud je průtok polymerního roztoku tryskou konstantní, rychlost rozpadu proudu závisí na molekulové hmotnosti polymeru a rychlosti odpařování rozpouštědla bez ohledu na podmínky vnějšího prostředí. Roztok polymeru s nízkou molekulovou hmotností nebo s těkavým rozpouštědlem vede k rychlejšímu rozpadu paprsku, což vede k elektrorozprašování.

Síly působící na paprsek se v průběhu času mění. Na paprsek působí několik sil v různých směrech, což vede k různým nestabilitám. Rozdělení paprsku do několika paprsků nastane, když se na špičce paprsku nahromadí náboj, což vede k rozvětvení do dílčích paprsků v procesu známém jako rozstříkování. Rozstříkování závisí na fyzikálních a elektrických vlastnostech použitého rozpouštědla a molekulové hmotnosti polymerů. Obecně se také vyskytuje, když se pro elektrostatické zvlákňování používá relativně vysoké elektrické pole.

V případech, kdy je použité elektrické pole vyšší než kritická hodnota, ustoupí Taylorův kužel do trysky a vznikne více paprsků vycházejících z jediné trysky. Tento proces je známý jako dělení paprsku. [39,40]

2.1.3 Tvorba nanovláken

Před dopadem paprsku na sběrný substrát před kolektorem, tuhne a tvoří nanovlákná. Použité elektrické pole, použité rozpouštědlo a koncentrace polymeru hrají hlavní roli při tuhnutí paprsku a odpařování rozpouštědel. Proces zvaný slepení, kdy částečně ztuhlé paprsky vedou k produkci vláken, která jsou připojena v bodech kontaktu, ovlivňuje morfologii a mechanické vlastnosti vláken. V celém procesu mají okolní podmínky vliv na tvorbu Taylorova kužele, který ovlivňuje strukturu nanovláken (průměr nanovláken, morfologii a mechanické vlastnosti). Například vyšší vlhkost vede k tvorbě pórů na povrchu nanovláken. Celý proces elektrostatického zvlákňování lze upravit podle požadavků tak, aby poskytoval větší kontrolu nad parametry a aby bylo možné vyrobit nové nanostruktury. [36]

2.2 Další způsoby výroby

Existuje mnoho způsobů, jakými se nanovlákná dají vyrobit ať už pro experimentální či průmyslové využití. Nejpoužívanější metodou je elektrostatické zvlákňování, které bylo využito i v praktické části této práce. Zde jsou uvedeny další způsoby výroby nanovláken.

2.2.1 Samoskládání

Samoskládání biostruktur je proces, při kterém se malé molekuly spontánně skládají do dobře uspořádaných nanovláken. Dochází k tomu díky různým nekovalentním interakcím, jako jsou iontové vazby, vodíkové vazby nebo hydrofobní interakce, které dávají nanovláknitou strukturu. Injekce těchto molekul tvoří 3D supramolekulární, samoskládanou nanovláknitou gelovou síť pomocí iontových vazeb a pH spouštěčů za fyziologických podmínek. Tyto gely mají netoxické produkty rozkladu a nevyžadují drsná prostředí pro přípravu, což z nich činí vhodné nosiče pro dodání proteinů a buněk. [41,42]

2.2.2 Fázová separace

Tepelně indukovaná separace fází byla běžně používána k výrobě porézních polymerních tkáňových nosičů (scaffoldů). Metoda byla dále zkoumána k výrobě nanovláknitých 3D struktur z různých biologicky odbouratelných polymerů. Scaffoldy s porézní strukturou a propojenými prostory jsou velmi vhodné pro implantaci, především proto, že souvislá vláknitá síť poskytuje propojující mechanickou podporu pro uchycení, proliferaci (množení) a migraci buněk.

V této technice existuje pět základních kroků výroby: rozpouštění polymeru, separace fází, gelovatění, extrakce rozpouštědlem z gelu vodou, zmrazení a lyofilizace ve vakuu. Výběr vhodného rozpouštědla je považován za jeden z nejkritičtějších kroků tvorby nanovláknité struktury během tohoto procesu. Předpokládá se, že tvorba nanovláknité struktury je způsobena spinodální separací kapalných fází roztoků polymeru a následnou krystalizací fáze bohaté na polymer. Metoda nevyžaduje specializované nástroje a umožňuje také konzistenci mezi jednotlivými dávkami, zatímco architekturu a vlastnosti scaffoldů lze snadno ovládat změnou koncentrace polymeru, teploty a doby gelovatění, rozpouštědla a teploty tuhnutí. [41,43]

2.2.3 Mezifázová polymerace

Mezifázová polymerace byla vyvinuta jako přístup k syntéze velkého množství čistých, jednotných polyanilinových nanovláken. Typicky se nemísitelný systém sestávající z organického roztoku anilinu a vodného roztoku peroxysíranu amonného a kyseliny nechá nějakou dobu stát. Nanovláknina se získávají výhradně proto, že zelená polyanilinová nanovláknina vytvořená v raných fázích polymerace anilinu na organicko/vodném rozhraní difundují do vodné fáze, čímž zabraňují sekundárnímu přerůstání polyanilinu na nanovlákněch, která produkují aglomeráty běžně pozorované při tradiční chemické oxidační polymeraci anilinu v homogenních vodných systémech. Čistá polyanilinová nanovláknina jsou přítomna v podílu > 95 obj. %. Vytvořená nanovláknina jsou typicky zkroucená a propojená o průměrech v rozmezí od 30 nm do 50 nm a délce 500 nm až několik mikrometrů. Průměry nanovláken jsou ovlivněny volbou použité kyseliny, zatímco kvalita a jednotnost nanovláken jsou řízeny koncentrací kyseliny.

Čím vyšší je koncentrace kyseliny, tím vyšší je podíl nanovláken v konečném produktu. Typ organického rozpouštědla, koncentrace monomeru a použité reakční teploty nemají žádný vliv na velikost a morfologii polyanilinových nanovláken. Polyanilinová nanovláknina syntetizovaná mezifázovou polymerací mají bimodální distribuci molárních hmotností a vyšší průměrnou molární hmotnost ve srovnání s polyanilinem získaným tradiční chemickou oxidativní polymerací. [41,44]

2.2.4 Rychle iniciovaná polymerace

Rychle iniciovaná polymerace je alternativní technikou k mezifázové polymeraci pro syntézu čistých, jednotných polyanilinových nanovláken ve velkém měřítku. Obecně se roztok iniciátoru obsahující peroxydisíran amonný v kyselině chlorovodíkové nalije do

roztoku monomeru obsahujícího anilin v kyselině chlorovodíkové. Oba roztoky se pak rychle a intenzivně míchají dohromady po dobu 15 sekund a nechají se stát 1 den. Nanovlákná jsou tímto procesem vyráběna, protože sekundárnímu přerůstání polyanilinu na nanovláknách je zabráněno rychlou spotřebou molekul iniciátoru během fáze tvorby nanovláken anilinovou polymerací. Polyanilinová nanovlákná získaná rychle iniciovanou polymerací mají morfologii srovnatelnou s nanovláknými získanými mezifázovou polymerací. Typ použité kyseliny ovlivňuje velikost vzniklých polyanilinových nanovláken, zatímco polarita reakčního prostředí ovlivňuje kvalitu nanovláken. Čím polárnější je rozpouštědlo, tím lepší je kvalita nanovláken. Reakční teplota a koncentrace reaktantu nemají žádný vliv na morfologii nanovláken. [41,45]

2.2.5 Šablonová syntéza

Tato metoda usnadňuje výrobu řízených uspořádání nanovláken. Růst nanovláknitých polí založený na porézních šablonách lze dosáhnout pomocí dobře zavedených technik, jako je elektrochemická depozice a plnění šablon. Pomocí této techniky byly syntetizovány různé anorganické a organické materiály. Za hlavní nevýhodu této metody lze uvést degradaci šablony při delších polarizacích a nerovnoměrné vyplnění pórů. Touto metodou se vyvíjejí nanovlákná z materiálů jako NiO, Cu₂O, a ZnO.

Tato metoda je v podstatě procesem roztokové nebo koloidní disperze, ve kterém lze snadno ovládat geometrické vlastnosti, jako je průměr, hustota a délka 1D nanostruktury. Mezoporézní oxidy kovů, které jsou široce používány pro snímání a energetické aplikace, lze vyrábět s dobře definovanou a uspořádanou porézní strukturou pomocí použití povrchově aktivních látek jako šablon metodou sol-gel. Ve specifických případech se kopolymerní micely také používají jako šablony k výrobě takových nanostruktur.

V této metodě lze požadovanou velikost pórů, morfologii nanostruktur, distribuci velikosti a hustotu pórů získat výběrem vhodné šablony. Nejčastěji používanou šablonou jsou aluminiové membrány, které mají jednotné a paralelní póry vytvořené anodickou oxidací hliníkových plechů. Velikost pórů může být řízena chemickým rozpouštěním anodického oxidu. [41]

2.2.6 Růst pára-kapalina-pevná látka

Tato metoda je dobře známá pro syntézu jednorozměrných nanostruktur bez defektů pro širokou škálu materiálů. Parametry nanovláken, jako je průměr, délka a složení, stejně jako

směr růstu, lze efektivně ovládat pochopením mechanismu této metody. V růstu nanovláken touto metodou hraje hlavní roli tvorba kovových nanokapiček z plynných prekurzorů. Nejprve se v trubkové peci roztaví dispergované kovové nanokrystaly na jediném krystalickém substrátu. Různé procesní plyny zaváděné během tohoto procesu vedou k nasycení nanokapiček roztaveného kovu, které působí jako katalyzátory, což má za následek kontinuální srážení monokrystalických nanovláken, čímž se podporuje jednosměrný růst.

Touto metodou lze vyrábět jak hybridní, tak dopovaná nanovlákná. Orientaci růstu v jednotlivých rovinách lze účinně řídit vhodným výběrem substrátu a optimalizací odpovídající teploty a tlaku během růstu. Průměr 1D nanostruktury vytvořené touto metodou je řízen změnou růstových parametrů vyladěním vlastností kapky kapalně slitiny. Vznik nanočástic na substrátu hraje hlavní roli v růstu 1D nanostruktur. [41,46]

2.2.7 Hydrotermální syntéza

Tato metoda spočívá v růstu nanovláken v zahřátém kapalném roztoku pod tlakem v autoklávu při teplotě cca 100 - 300 °C. Růstové fázi dominuje chemický rozklad, během kterého tepelně degradované reaktivní ionty z prekurzorů v roztoku přispívají k růstu nanovláken. Růst může být usnadněn v konkrétní orientaci použitím vhodných katalyzátorů, které slouží ke snížení povrchové energie.

Tato metoda byla poprvé použita pro pěstování monokrystalů polovodičů, které byly později upraveny pro vývoj dalších nanostruktur. Růst nanovláken může být řízen parametry, jako je teplota, koncentrace prekurzoru, pH a další. Hlavní nevýhodou této metody je nízká úroveň krystalinity nanovláken. V hydrotermální syntéze jsou vlastnosti 1D nanostruktur definovány kinetikou procesu, která zase závisí na parametrech, jako je teplota a tlak v systému, trvání syntézy a počáteční pH roztoku.

Soli zvané mineralizátory hrají hlavní roli při poskytování superkritických podmínek pro hydrotermální syntézu, protože tvoří hydrotermální roztok, který určuje rozpustnost oxidů kovů, které mají být zpracovány. Pórovitost syntetizované 1D nanostruktury lze řídit výběrem vhodných povrchově aktivních látek pro cílený nanomateriál. Morfologie nanostruktur oxidů kovů je závislá na povrchově aktivních činidlech, které mají nesmírný vliv na hydrotermální růst. [41,47]

2.2.8 Výhody a nevýhody metod

Výhody a nevýhody výše uvedených způsobů výroby jsou detailněji rozepsány v příloze P I. Elektrostatické zvlákňování, samoskládání a fázová separace jsou způsoby obvykle používané pro lékařské aplikace. Pro chemické aplikace je běžně používáno elektrostatického zvlákňování, mezifázové polymerace a rychle iniciované polymerace jako metody pro výrobu nanovláken. Pro výrobu nanovláken v elektronice je využíváno metod elektrostatického zvlákňování, šablonové syntézy, růst pára-kapalina-pevná látka a hydrotermální syntézy. Možno si povšimnout, že elektrostatické zvlákňování je unikátní výrobní metoda, kterou lze použít pro tyto tři hlavní aplikace. Je to dáno tím, že tato metoda je flexibilní ve výběru materiálů (organických i anorganických) a různorodá v nanovláknitých architekturách a průměrech nanovláken. [41]

3 FILTRACE VZDUCHU

Zachycování aerosolových částic filtrace je nejběžnější a široce používanou metodou pro čištění vzduchu. Filtrace je jednoduchý, všestranný a ekonomický prostředek pro záchyt aerosolových částic. Při nízkých koncentracích prachu jsou vláknité filtry nejekonomičtějším prostředkem pro dosažení vysoce účinného zachycování submikronových částic. Aerosolové filtrace se využívá v různých aplikacích jako je ochrana dýchacích cest, klimatizace, čištění vzduchu z hutí a další. Proces filtrace je komplikovaný, a přestože jsou obecné principy dobře známy, stále existuje rozdíl mezi teoretickými předpoklady a experimentálními výsledky. [48]

3.1 Makroskopické vlastnosti filtrů

Nejdůležitějšími typy filtrů pro záchyt částic aerosolů jsou vláknité a porézní membránové filtry. Vláknité filtry se skládají z rohože z jemných vláken uspořádaných tak, že většina je kolmá ke směru proudění vzduchu. Tyto filtry jsou většinou vzduchové s porézností od 70 % do více než 99 %. Nejběžnějšími typy jsou celulózová vlákna, skleněná vlákna a polymerní vlákna. Rychlost vzduchu přes vysoce účinné filtry je obvykle poměrně nízká. Kvůli nízkým používaným rychlostem vzduchu je často nutné skládat filtrační materiál, aby se získala velká plocha filtru.

Obvyklá mylná představa je, že aerosolové filtry fungují jako mikroskopická síta, kterými projdou pouze částice menší, než jsou jejich otvory. Tento pohled může být vhodný pro kapalinovou filtraci pevných částic. Jak bude popsáno, částice jsou odstraněny vláknitým filtrem, když se střetnou a přichytí se k povrchu vláken.

Porézní membránové filtry mají strukturu odlišnou od vláknitých filtrů s menší porozitou (50 % - 90 %) než vláknité filtry. Proudnice plynu přes filtr má nepravidelnou cestu přes složitou strukturu pórů. Částice se ztrácejí z proudnice plynu, protože se ukládají na strukturálních prvcích, které tvoří póry. Membránové filtry mají vysokou účinnost a větší odolnost proti proudění vzduchu než jiné typy filtrů. Vysoká účinnost porézních membránových filtrů se vztahuje i na aerosolové částice mnohem menší, než je velikost pórů udávaná výrobcem. Porézní membránové filtry jsou vyrobeny z esterů celulózy, slinutých kovů, polyvinylchloridu a dalších polymerů.

Pro daný vláknitý filtr existuje velikost částic, obvykle mezi 0,05 μm a 0,5 μm , která se nejméně zachytává. To znamená, že všechny částice větší nebo menší než tato velikost, jsou

zachycovány s větší účinností. Pro danou velikost částic existuje také rychlost pro minimální účinnost záchytu částic. Tyto účinky a mechanismy, které je způsobují, jsou podrobně popsány v následující části.

Struktura filtru vytváří odpor proudu vzduchu, který jím proudí. Tento jev se označuje jako tlaková ztráta. Při dané čelní rychlosti je tlaková ztráta filtru přímo úměrná tloušťce filtru. To by mělo být zřejmé, vezmeme-li v úvahu, že účinek zdvojnásobení tloušťky je ekvivalentní provozu dvou identických filtrů v sérii. Proud vzduchu a odpor bude u obou filtrů stejný a jelikož jsou v sérii, je třeba odpory sečíst. Proudění uvnitř většiny filtrů je laminární, takže pokles tlaku je přímo úměrný průtoku.

Změna jakékoli vlastnosti filtru způsobí změnu jak filtrační účinnosti pro danou velikost částic, tak i tlakového odporu. Nejlepší filtr je ten, který poskytuje nejvyšší filtrační účinnost při nejmenším tlakovém odporu. [48,49]

3.2 Účinnost jednoho vlákna

Vláknitá filtrace je složitý proces a pouze analýzou tohoto procesu na jeho nejzákladnější úrovni, sběru částic jednotlivým vláknem, se projeví vliv různých parametrů, jako je průměr částice, průměr vlákna, čelní rychlost a objemový zlomek vláken ve filtru.

Základním přístupem je uvažovat o jediném vlákně umístěném s osou kolmou k proudu vzduchu uprostřed filtru a analyzovat několik mechanismů, kterými lze na tomto vlákně shromažďovat částice. Předpokládáme, že částice se při kontaktu s vláknem zachytí a je trvale odstraněna z proudu aerosolu.

Při laminárním toku ovlivňuje narušení proudění způsobené jedním vláknem proudění kolem sousedních vláken, i když jsou vzdálená o mnoho průměrů vláken. Modernější teorie jednoho vlákna sleduje stejný přístup jako teorie izolovaných vláken, ale bere v úvahu vliv sousedních vláken. [48,50]

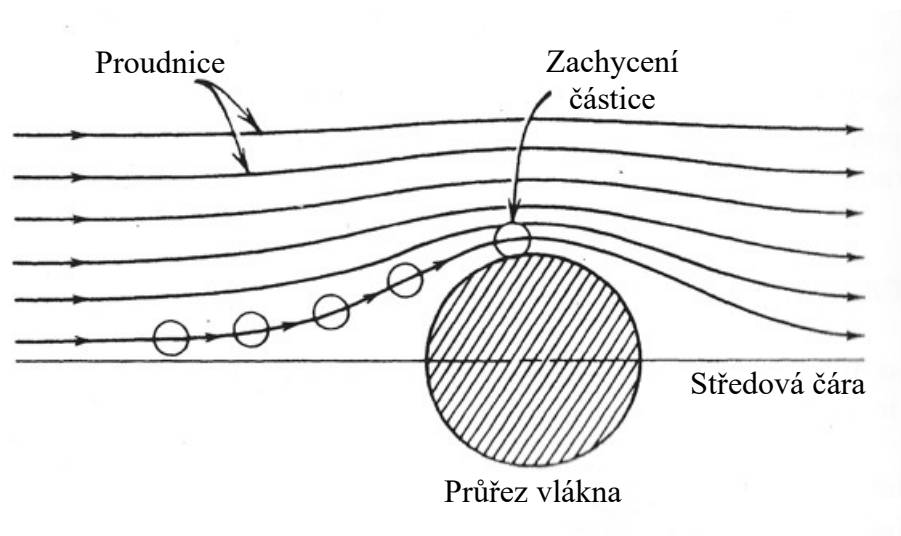
3.3 Mechanismy záchytu

Existuje pět základních mechanismů, kterými lze aerosolové částice zachytit na vlákno ve filtru.

3.3.1 Zachycení

Zachycení částic nastává, když částice putuje po proudnici plynu, který se náhodou dostane do těsné vzdálenosti od povrchu vlákna, jak je znázorněno na obrázku 11. Částice narazí na

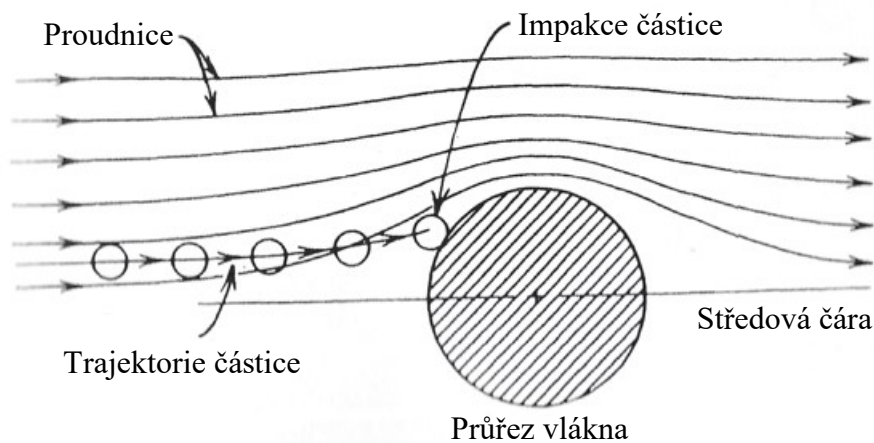
vlákno a je zachycena kvůli své konečné velikosti. Pro částici dané velikosti tedy určité proudnice povedou k zachycení částice, zatímco jiné proudnice nikoli. Pro ideální zachycení se předpokládá, že částice dokonale sledují proudnice, to znamená, že mají zanedbatelnou setrvačnost, usazování a Brownův pohyb. Zachycení je jediný mechanismus, který není výsledkem odchýlení částice od původní proudnice plynu. Zachycení je důležitý sběrný mechanismus v rozsahu velikosti částic s minimální účinností a jediný mechanismus, který nezávisí na rychlosti proudění. [48]



Obrázek 11: Zachycení [48]

3.3.2 Impakce

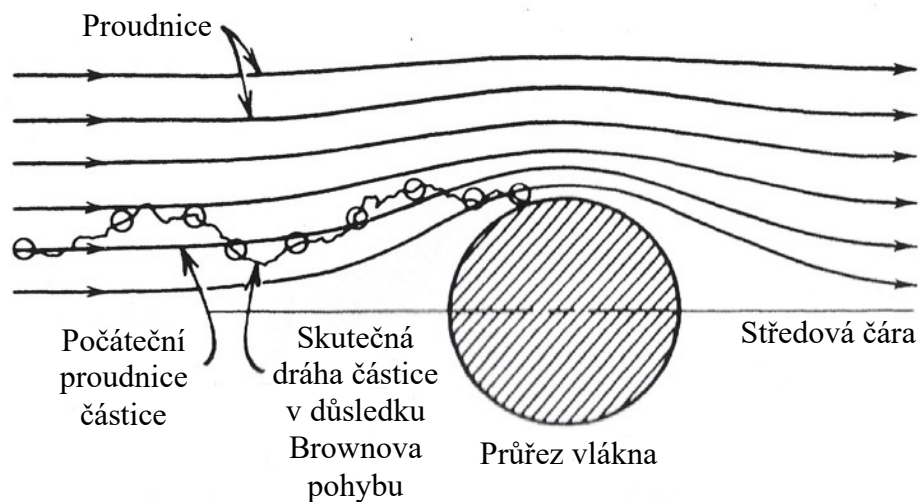
Impakce částice na vlákno nastává, když se částice v důsledku své setrvačnosti nedokáže dostatečně rychle přizpůsobit náhle se měnícím proudnicím v blízkosti vlákna a překračuje tyto proudnice, aby zasáhla vlákno, jak je znázorněno na obrázku 12. Impakce je nejdůležitějším mechanismem pro záchyt velkých částic, ale takové částice jsou často zachycovány mechanismem zachycení. [48]



Obrázek 12: Impakce [48]

3.3.3 Difuze

Brownův pohyb je speciální typ difuze, při kterém dochází k náhodnému pohybu částic. Brownův pohyb malých částic je dostatečný k tomu, aby výrazně zvýšil pravděpodobnost, že narazí na vlákno, když se kolem něj pohybují po neprotínající se proudnicích. Obrázek 13 znázorňuje dráhu jedné takové částice. [48]



Obrázek 13: Difuze [48]

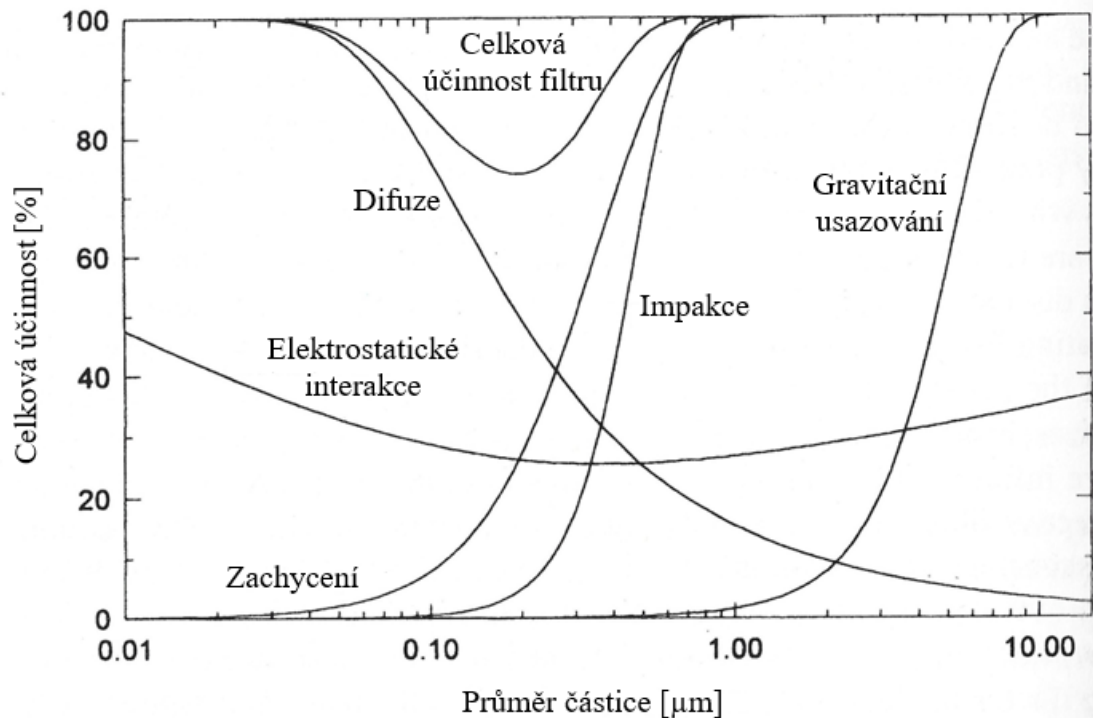
3.3.4 Gravitační usazování

Gravitační usazování je proces, při kterém se částice usazují na filtru a tvoří sediment. Částice, na které působí gravitační síla budou mít tendenci se pohybovat ve směru, kterým tato síla působí. [48]

3.3.5 Elektrostatické interakce

Tento mechanismus záchytu částic může být extrémně důležitý, ale je obtížné jej kvantifikovat, protože vyžaduje znát náboj na částicích a na vláknech. Je často opomíjen, pokud částice nebo vlákna nebyly nabity nějakým měřitelným nábojem. [48]

3.4 Filtrační účinnost



Obrázek 14: Celková filtrační účinnost [48]

Obrázek 14 zobrazuje celkovou filtrační účinnost filtru. Pro tento filtr jsou zachycení a impakce zanedbatelné pro malé částice, ale rychle se zvyšují pro částice větší než $0,3 \mu\text{m}$. Difuze je jediným důležitým mechanismem pro částice pod $0,2 \mu\text{m}$, ale u částic nad touto velikostí má klesající význam. U všech velikostí částic je gravitační usazování malé ve srovnání s ostatními mechanismy.

Velikost částic, která poskytuje minimální účinnost (v tomto případě $0,2 \mu\text{m}$), je velikost, která je příliš velká na to, aby byla účinná difuze, a příliš malá na to, aby byla účinná impakce nebo zachycení. Protože tyto konkurenční mechanismy jsou nejúčinnější v různých rozmezích velikostí, mají všechny filtry velikost částic, která poskytuje minimální účinnost, obvykle v rozmezí $0,05 \mu\text{m} - 0,5 \mu\text{m}$. Taková velikost částic se nazývá nepronikavější velikost částic. Extrém na křivce celkové účinnosti filtru je označován jako MPPS (maximum penetrating particle size). [48]

3.5 Faktor kvality

Faktor kvality (q_F) je užitečné srovnávací kritérium. Pro filtrační materiály je faktor kvality dán poměrem filtrační účinnosti, respektive propustností částic a tlakovou ztrátou. Čím větší jsou hodnoty faktoru kvality, tím lepší je filtr. Srovnávání faktoru kvality musí být prováděno při stejné čelní rychlosti a se stejnou velikostí filtrovaných částic. [48,51]

$$q_F = \frac{\ln(1/P)}{\Delta p} \quad (1)$$

Kde: q_F Faktor kvality [kPa^{-1}]

P Propustnost částic [%]

Δp Tlaková ztráta [kPa]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 POUŽITÉ CHEMIKÁLIE, POMŮCKY A PŘÍSTROJE

4.1 Použité chemikálie

C_3H_7NO	Dimethylformamid (Fisher scientific)
$CHCl_3$	Chloroform (Penta)
C_3H_6O	Aceton (Lachner)
$C_6H_8O_7$	Kyselina citronová (Sigma Aldrich)
$Na_2B_4O_7 \cdot 10 H_2O$	Tetraboritan sodný dekahydrát - borax (Sigma Aldrich)

Všechny použité chemikálie byly v čistotě p.a.

4.2 Přístrojové vybavení

- Analytické váhy (Kern)
- Laboratorní předvážky (Kern)
- Zařízení pro výrobu nanovláken (SpinLine 40 SPUR)
- Elektronový mikroskop (Vega 3, Tescan)
- Zařízení pro měření pórovitosti (SPUR)
- Viskozimetr (Brookfield)
- Přístroj pro měření elektrické vodivosti (Gryf 158)
- Přístroj pro měření filtrační účinnosti (TSI 3160)
- Běžné laboratorní sklo a pomůcky.

5 METODIKA

5.1 Výroba a testování nanovláken

Nanovlákná zkoumaných materiálů byla vyrobena na přístroji SpinLine 40 (obrázek 15), vyrobeném ve SPUR a.s., Zlín. Principem bylo si předem připravit roztok polymeru, převést ho do injekční stříkačky o objemu 20 ml a tu následně přemístit do přístroje a nastavit parametry pro daný roztok. Mezi volitelné parametry patřil substrát, na který se vlákna zachycovala, dávkování roztoku, použité napětí, vzdálenost mezi emitorem a kolektorem, rychlost posunu substrátu a rychlost dávkování polymerního roztoku.



Obrázek 15: Zařízení SpinLine 40

Po přemístění injekční stříkačky do přístroje se zapnulo dávkování roztoku a napětí. V tomto momentu začaly nabitě kapičky roztoku vzlétat nahoru směrem k uzemněnému kolektoru ve formě nanovláken, aby se zde vybily. Sběrný substrát se odvíjel a byl překryt krycí fólií, aby nedošlo k porušení připravených nanovláknitých struktur.

Zvlákňování probíhalo po dobu, dokud se nezvláknilo určité množství roztoku. Následně byly buďto upraveny podmínky zvlákňování nebo byl proces zastaven. Poté z navinutého sběrného substrátu byly odebrány vzorky na další analýzy.

5.1.1 Příprava roztoku PU

Testované PU roztoky byly připraveny polyadící z diisokyanátu (4,4-methylenbis(fenylizokyanát)-MDI): polyesterového diolu (poly(3-methyl-1,5-pentadiol)-alt-(adipová, izoftalová kyselina)) a prodlužovačů řetězců v molárním poměru 9/1/8. Pro syntézu PU 918 byl jako prodlužovač řetězců použit jen 1,4 butandiol (1,4BD), PU 918 QAS byl dloužený dvěma prodlužovači řetězců, a to 1,4 BD a diolem obsahujícího kvartérní aminiovou sůl (QAS) tak, že obsah QAS v celkovém složení PU 918 QAS byl 7 hm. %. Bylo připraveno 5 roztoků o různém složení, koncentracích a elektrických vodivostech (tabulka 4). Elektrické vodivosti byly upravovány roztokem boraxu a kyseliny citronové (BC) v DMF nebo přítomností QAS.

5.1.2 Příprava roztoku PLA

Na přípravu roztoku bylo použito PLA INGENIO 4060D od firmy NatureWorks, USA. Byl připraven roztok o koncentraci 16 hm. %. Jako rozpouštědla byla použita dimethylformamid a kombinace dimethylformamid s acetonem v poměru 80 % dimethylformamidu a 20 % acetonu.

5.1.3 Příprava roztoku PBS

Na přípravu roztoku byl použit PBS BioPBS s označením FD92PM od firmy PTT MCC Biochem Company, Bangkok. Byl připraven roztok o koncentraci 12 hm. %. Granulát byl první den rozpuštěn v čistém chloroformu a druhý den byl přidán dimethylformamid pro zlepšení jak rozpustitelnosti, tak i elektrické vodivosti. Rozpouštědla byla v poměru 77 % chloroformu a 23 % dimethylformamidu. Roztok byl míchán při zvýšené teplotě 40 °C.

5.1.4 Příprava vzorku PBS/PU

Na přípravu roztoku byly použity již výše zmíněné materiály. Nejprve byl připraven roztok PBS o koncentraci 12 hm. % již zmíněným způsobem a poté byl k tomuto roztoku přidán v poměru 2:3 předem připravený roztok PU o koncentraci 18 hm. %, jehož sušinu tvořilo 93 % PU 918 a 7 % QAS. Výsledná koncentrace roztoku byla 15,6 hm. %.

5.2 Testování nanovláknitých struktur

Nanovláknina byla testována pomocí následujících analýz.

5.2.1 Stanovení plošné hmotnosti

Z připravených nanovláken nanesených na substrátu byla vyseknuta destička o rozměrech 10x10 cm. Nanovláknna byla sundána ze substrátu a byla stanovena hmotnost na analytických vahách s přesností na 2 desetinná místa. Ze získaných hmotností byla vypočtena plošná hmotnost (PH) na 1 m².

5.2.2 Měření elektrické vodivosti

Pro měření elektrické vodivosti připravených roztoků byl použit konduktometr (obrázek 16) GRYF 158 (GRYF HB, spol. s.r.o., Česká republika). Měření probíhalo tak, že se elektroda promyla v příslušném rozpouštědle a poté byla měřena hodnota elektrické vodivosti do ustálené hodnoty.



Obrázek 16: Konduktometr a elektroda

5.2.3 Měření viskozity roztoků

Na měření viskozity připravených roztoků byl použit viskozimetr od firmy Brookfield, USA (obrázek 17). Viskozita byla vždy měřena při pokojové teplotě a na měření bylo použito vždy čidlo číslo 4.



Obrázek 17: Viskozimetr s čidlem

5.2.4 Rastrovací elektronová mikroskopie

Pro analýzu morfologie nanostruktur byla provedena rastrovací elektronová mikroskopie. Byl využit mikroskop SEM Vega 3 od společnosti Tescan, Česká republika. Vzorky byly zkoumány při různých zvětšeních a byly potaženy tenkou vrstvou palladia, aby se zvýšila jejich elektrická vodivost před pořízením snímků, jelikož povrch samotných polymerů je nevodivý.

5.2.5 Stanovení průměru vláken

Pro stanovení průměru vláken byly využity snímky z rastrovacího elektronového mikroskopu a program ImageJ, USA. Stanovení bylo prováděno na sto různých místech ve vzorku a poté byl vypočten průměr ze změřených hodnot.

5.2.6 Stanovení pórovitosti

Charakteristiky týkající se velikosti pórů membrán byly vyhodnoceny na průtokovém porometru (obrázek 18) (CPS, Česká republika), v souladu s normou ASTM F316-03. Jako smáčecí kapalina byl použit Galpor (Porometer NV, Belgie). Testy za sucha a za mokra byly provedeny na jednom kruhovém vzorku vyříznutém z testovaných materiálů. Výsledná porometrická měření definovala střední průměry pórů nanostruktur, maximální průměr pórů a propustnost nanostrukturovaných membrán pro suchý vzduch. Byla také stanovena distribuce velikosti pórů.



Obrázek 18: Průtokový porometr

5.2.7 Měření filtrační účinnosti

Vlastnosti filtrů byly měřeny na zařízení Fractional Efficiency Filter Tester - TSI 3160 (obrázek 19) na CPS, Česká republika. Vzorky byly měřeny při průtoku aerosolu 30 l/min a odpovídající čelní rychlosti 5,2 cm/s. Princip měření spočívá v měření proudu částic různých průměrů před a za filtrem pomocí laserů.



Obrázek 19: Příklad přístroje na měření filtračních vlastností

6 VÝSLEDKY A DISKUZE

6.1 Výroba nanovláken

Na zařízení SpinLine 40 byly v elektrostatickém poli připraveny nanovlákná ze všech testovaných polymerních roztoků. Všechny vzorky byly nanášeny na polypropylenový spun bond (PP SB). V následujících kapitolách je podrobně popsán postup přípravy vláknitých nanostruktur a mikrostruktur.

6.1.1 Výroba nanovláken z PU

Před zahájením zvláknovacího procesu, byl předem připravený roztok převeden do injekční stříkačky o objemu 20 ml, která byla umístěna do přístroje a byly nastaveny parametry procesu. Pro zvláknění vzorku PU byly použity parametry, které jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1: Procesní parametry pro PU

Označení nanostruktury	PU 281	PU 200	PU 196	PU 186	PU 166
Koncentrace roztoku [%]	18	18	25	27	27
El. vodivost roztoku [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	145,8	144,3	274	281	281
Aditivum pro zvýšení el. vodivosti roztoku	BC	BC	QAS	BC	QAS
Viskozita roztoku [Pa.s]	1,40	2,80	0,70	2,45	2,45
Použité napětí [kV]	75	72	75	60	60
Dávkování roztoku [ml/min]	0,2704	0,1672	0,1672	0,1672	0,1328
Vzdálenost elektrod [cm]	19	19	19	20	21
Teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$]	23,5	22,0	22,3	22,9	22,0
Relativní vlhkost vzduchu [%]	20,7	23,3	18-23	25,3	23,3

6.1.2 Výroba nanovláken z PLA

Před zahájením zvláknovacího procesu, byla injekční stříkačka s roztokem umístěna do přístroje a byly nastaveny parametry procesu. Pro zvláknění vzorku PLA INGENIO 4060D byly použity parametry, které jsou uvedeny v tabulce 2. Všechny ostatní vlastnosti testovaných PLA roztoků byly konstantní – koncentrace $c = 16$ hm. %, elektrická vodivost $\chi = 139,6 \mu\text{S/cm}$, viskozita roztoku $\eta = 1,05 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, stejně jako procesní parametry – použité napětí $U = 75 \text{ kV}$, dávkování roztoku $D = 0,37 \text{ ml/min}$ a vzdálenost elektrod $V = 20 \text{ cm}$. Jako aditivum pro zvýšení elektrické vodivosti byl použit borax a kyselina citronová. Teplota vzduchu byla $21,5 \text{ }^\circ\text{C}$ a relativní vlhkost vzduchu byla $33,4 \%$.

Tabulka 2: Procesní parametry pro PLA

Označení nanostruktury	PLA 219	PLA 221	PLA 207	PLA 205	PLA 220
Rychlost posuvu sběrného substrátu [m/min]	0,575	0,490	0,400	0,316	0,225
Plošná hmotnost nanostruktury [g/m ²]	0,28	0,33	0,42	0,56	0,62

6.1.3 Výroba nanovláken z PBS

Před zahájením zvláknovacího procesu, byl předem připravený roztok převeden do injekční stříkačky o objemu 20 ml, která byla umístěna do přístroje a byly nastaveny parametry procesu. Výroba nanovláken z PBS byla značně náročnější. Docházelo totiž po 24 hodinách k tvorbě gelu při chladnutí roztoku. Pro zvláknění vzorku PBS byly použity parametry, které jsou uvedeny v tabulce 3. Všechny ostatní vlastnosti testovaných PBS roztoků byly konstantní – koncentrace $c = 12$ hm. %, elektrická vodivost $\chi = 17,82 \mu\text{S/cm}$, viskozita roztoku $\eta = 0,4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, stejně jako procesní parametry – použité napětí $U = 60 \text{ kV}$, rychlost posuvu sběrného substrátu $v = 0,1 \text{ m/min}$ a vzdálenost elektrod $V = 18 \text{ cm}$. Jako aditivum pro zvýšení elektrické vodivosti byl použit borax a kyselina citronová. Teplota vzduchu byla $25 \text{ }^\circ\text{C}$ a relativní vlhkost vzduchu byla $30,5 \%$.

Tabulka 3: Procesní parametry pro PBS

Označení nanostruktury	PBS 599	PBS 1531
Dávkování roztoku [ml/min]	0,68	1,03
Plošná hmotnost nanostruktury [g/m ²]	3,50	6,28

6.1.4 Výroba vláken z PBS/PU

Postup přípravy vláknotvorného procesu byl stejný jako v předchozích případech. Pro zvláknění vzorku PBS/PU byly použity parametry, které jsou uvedeny v tabulce 4. Všechny ostatní vlastnosti testovaného PBS/PU roztoku byly konstantní. Koncentrace $c = 15,6$ hm. %, elektrická vodivost $\chi = 293 \mu\text{S/cm}$, viskozita roztoku $\eta = 0,35$ Pa.s, stejně jako procesní parametry – použité napětí $U = 60$ kV, dávkování roztoku $D = 0,51$ ml/min a vzdálenost elektrod $V = 18$ cm.

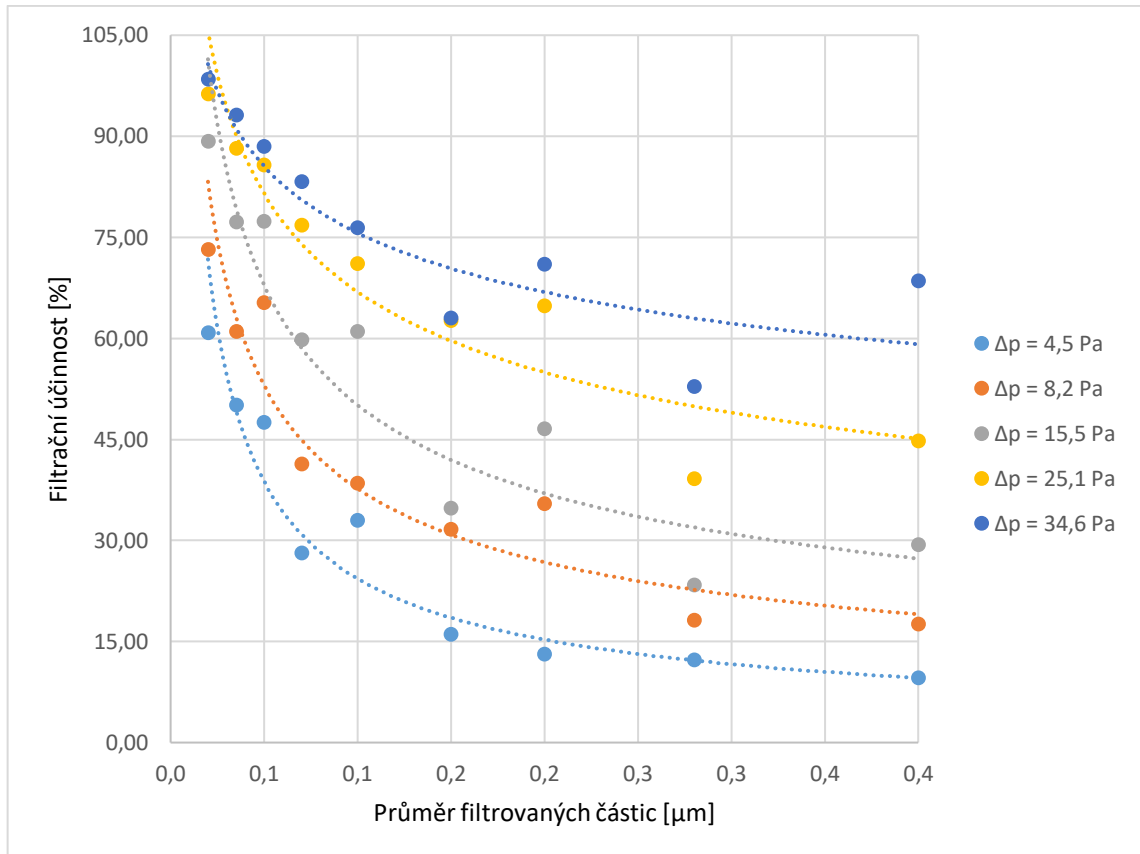
Tabulka 4: Procesní parametry pro PBS/PU

Označení nanostruktury	PBS/PU 146	PBS/PU 153	PBS/PU 162	PBS/PU 173
Rychlost posuvu sběrného substrátu [m/min]	0,18	0,1	0,1	0,19
Plošná hmotnost nanostruktury [g/m ²]	0,18	0,54	0,68	0,29

6.2 Charakterizace filtračních materiálů

6.2.1 Filtrační vlastnosti podkladového substrátu PP 30

Polypropylenový spun bond (SB) s plošnou hmotností $30 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (PP 30) při různých tlakových ztrátách (Δp) má filtrační účinnosti (FE) demonstrované na obrázku 20. Dle očekávání velmi jemné částice (menší než 100 nm) mají díky svému intenzivnímu Brownovu pohybu větší záchyt na PP mikrovlákněch a s rostoucí velikostí submikronových částic jejich účinnost záchytu klesá.



Obrázek 20: Závislost filtrační účinnosti na průměru filtrovaných částic pro PP 30
Při přípravě nanostrukturovaných materiálů pro filtrace vzduchu jsme se zaměřili především na PU a PLA polymery, s kterými lze v dlouhodobých výrobních procesech dosáhnout homogenních materiálů s konstantními vlastnostmi.

6.2.2 Charakterizace PU nanostruktur

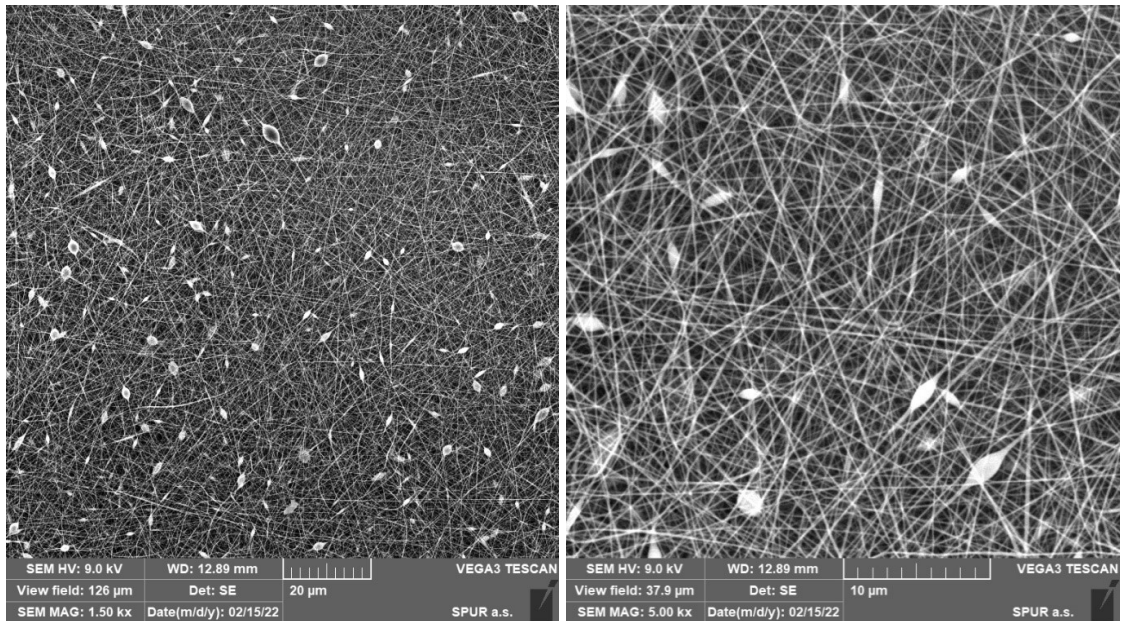
Vliv přítomnosti beads defektů v PU nanostrukturách na jejich filtrační vlastnosti

Tabulka 5: Charakterizace PU nanostruktur, sumarizace proměnných ovlivňujících morfologii nanostruktury a filtrační vlastnosti

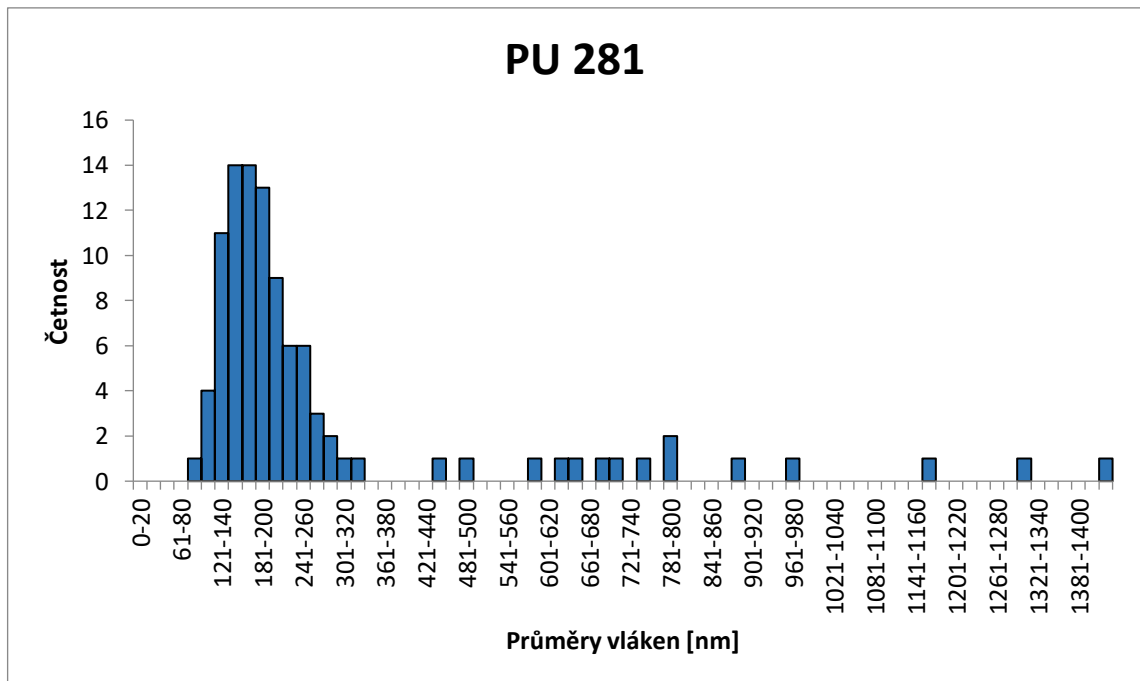
Označení nanostruktury	PU 281	PU 200	PU 196	PU 186	PU 166
Plošná hmotnost nanostruktury [g·m ⁻²]	1,22	1,02	1,08	1,02	0,47
Střední hodnota průměru vláken [nm]	281	200	196	186	166
Nejčtetnější interval průměrů vláken [nm]	141-180	161-180	181-200	141-160 241-260	161-180
Střední průměr pórů [nm]	380	720	420	770	860
Maximální průměr póru [nm]	440	820	480	930	1 000
Permeabilita pro suchý vzduch [l·min ⁻¹ ·bar ⁻¹ ·cm ⁻²]	36	197	106	194	235
Filtrační účinnost v MPPS [%]	99,99981	99,84776	99,99999	99,80472	94,74141
Tlaková ztráta [Pa]	477	169	394	137	57
Faktor kvality [kPa ⁻¹]	27,62	38,39	40,91	45,54	51,67

Přítomnost beads byla v některých případech dosažena vhodnou kombinací koncentrace, viskozity, elektrické vodivosti a dávkování roztoku. První čtyři testované materiály mají srovnatelnou plošnou hmotnost. SEM snímky srovnávaných nanostruktur při zvětšeních 1500x a 5000x a histogramy distribuce průměru nanovláken a beads pro diskutované PU nanostruktury jsou prezentovány na obrázcích 21-24. Nanostruktury s beads mají vyšší FE, větší tlakovou ztrátu a nižší faktor kvality než bezdefektní nanostruktury.

PU 281, PH = 1,22 g·m⁻²

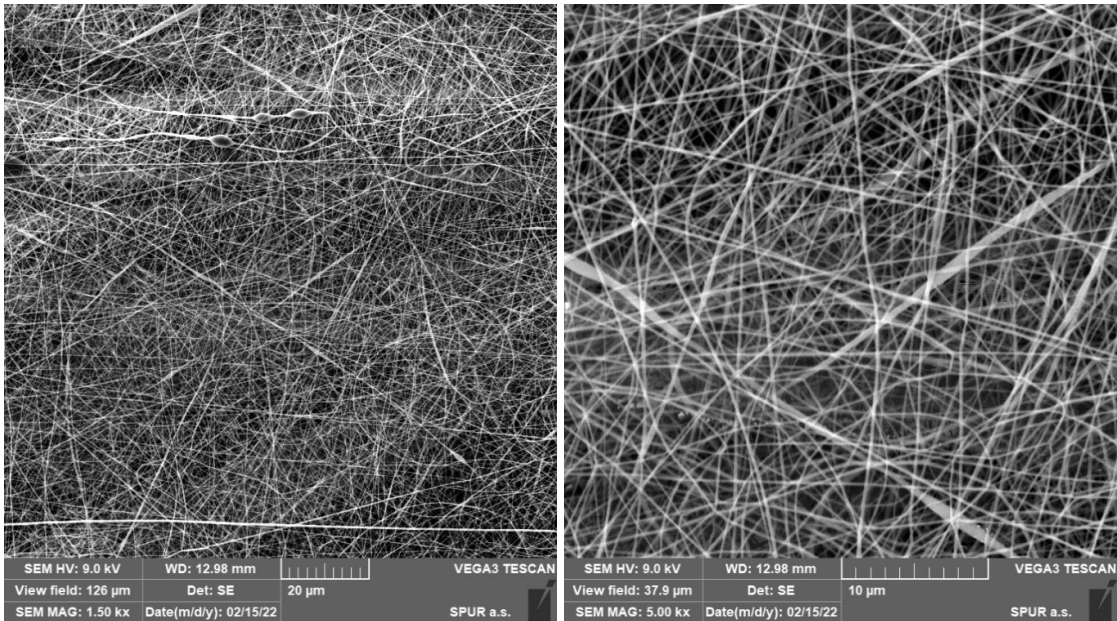


Obrázek 21: Snímky vzorku PU 281 pořízené na SEM při zvětšení 1500x a 5000x

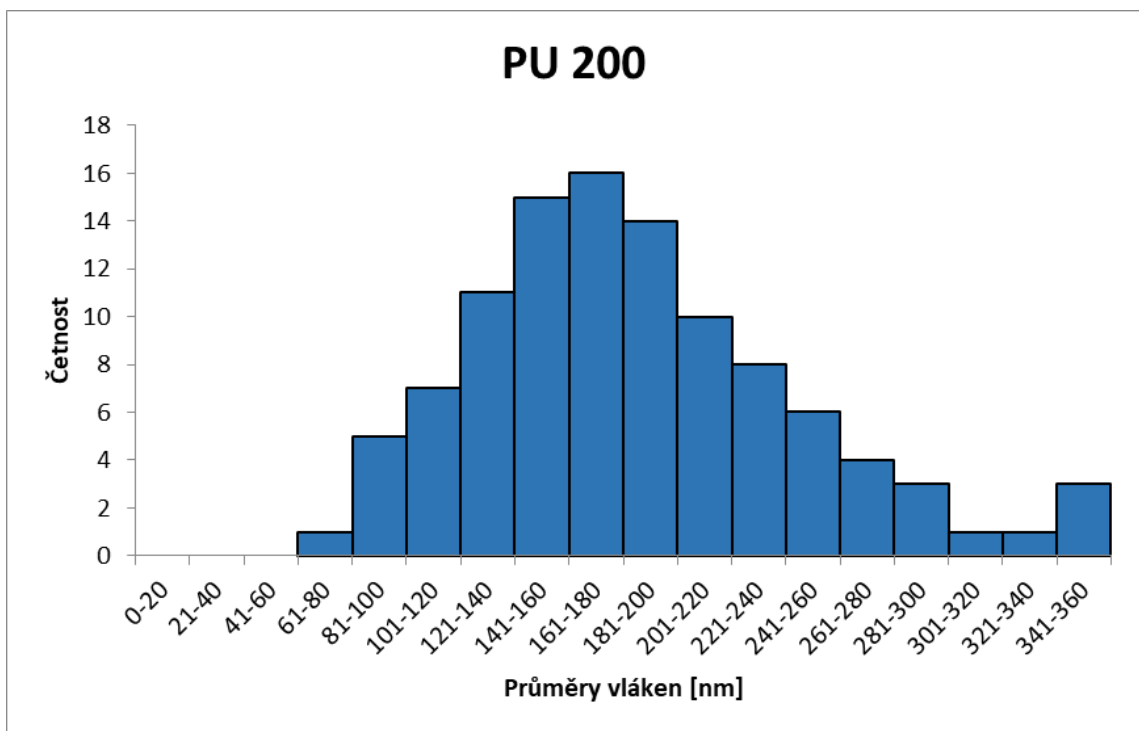


Obrázek 22: Histogram průměrů vláken pro vzorek PU 281

PU 200, PH = 1,02 g·m⁻²

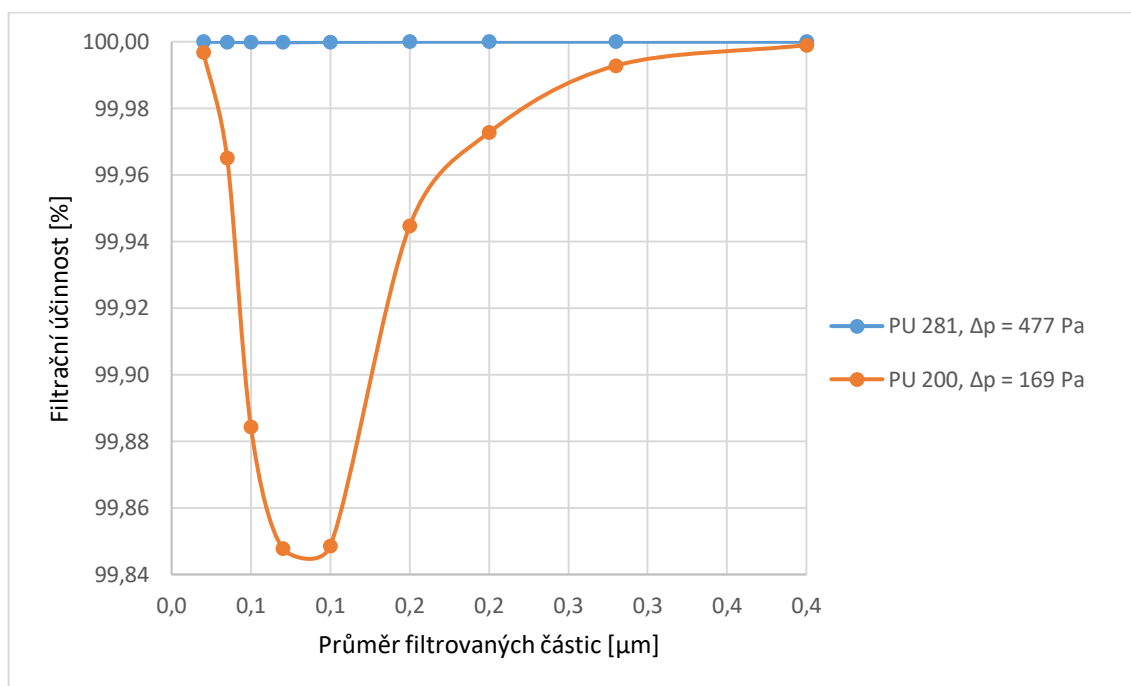


Obrázek 23: Snímky vzorku PU 200 pořízené na SEM při zvětšení 1500x a 5000x



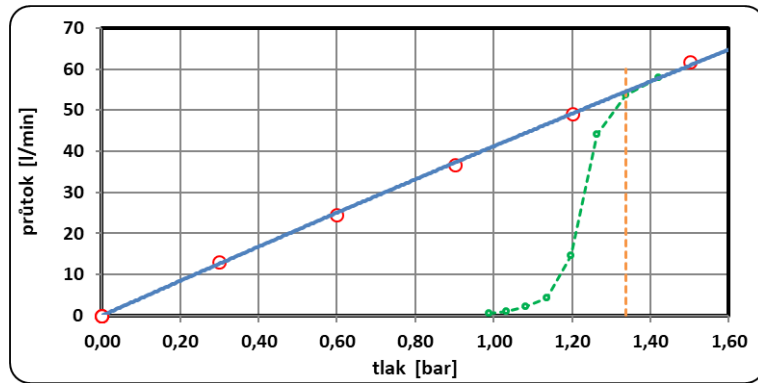
Obrázek 24: Histogram průměrů vláken pro vzorek PU 200

Srovnání SEM snímků a histogramů průměru vláken u nanostruktur PU 281 a PU 200 prokazuje přítomnost beads ve struktuře PU 281, přičemž materiály obsahující beads mají nižší střední průměr pórů (SPP 380 nm ve srovnání s 720 nm u otevřenější struktury). Zajímavé je srovnání filtračních vlastností těchto dvou nanostruktur. PU 281 s beads a menší pórovitostí má velkou filtrační účinnost a zároveň vysokou tlakovou ztrátu, zatímco nanostruktura PU 200 bez beads s větší velikostí pórů má menší filtrační účinnost a menší tlakový odpor (obrázek 25). Její výsledný faktor kvality je ale o 40 % vyšší než u PU 281.

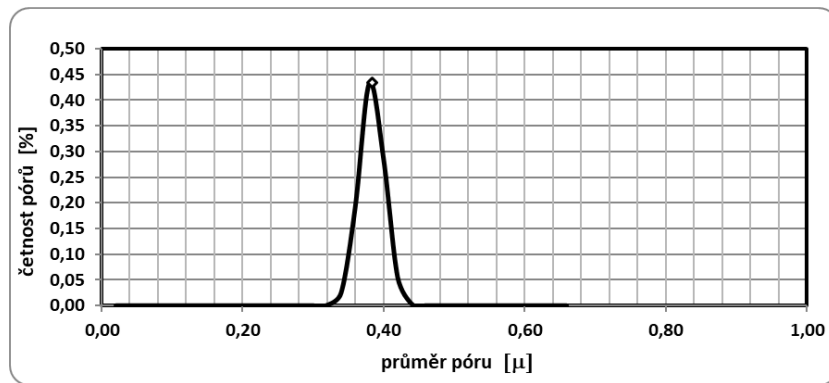


Obrázek 25: Závislost filtrační účinnosti na průměru filtrovaných částic pro vybrané vzorky PU 281 a PU 200

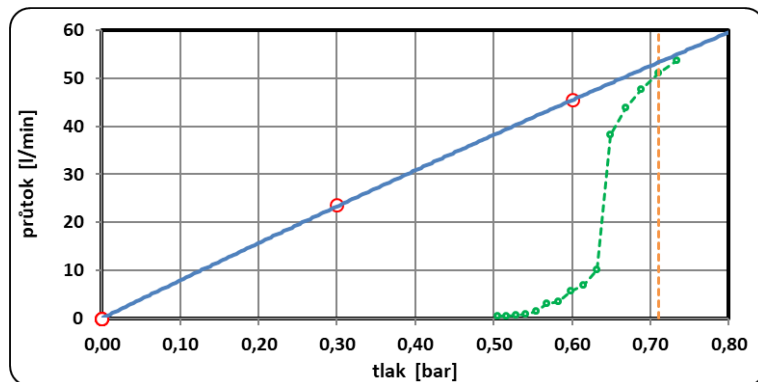
Na následujících obrázcích (26-29) jsou prezentovány výsledky porometrie nanostruktur PU 281 s obsahem beads a PU 200, tvořené jen nanovláknem. Ze závislosti průtoků pro suchý vzduch a kapalinu byly stanoveny hodnoty pro střední průměr pórů (SPP), maximální průměr póru, distribuce velikosti pórů a permeabilita pro suchý vzduch (36 vs. 197 $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$). Porovnání permeabilit pro suchý vzduch prokazuje přítomnost objemných překážek v nanostrukturách s obsahem beads.



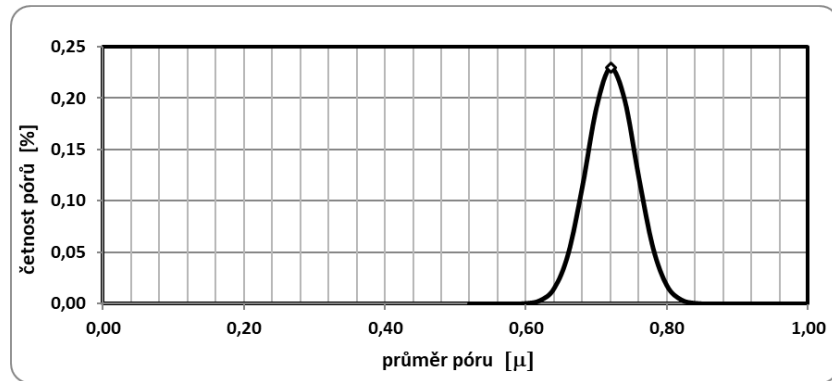
Obrázek 26: Stanovení porovitosti suchý test (modrá přímka) a mokrý test (zelená křivka) pro vzorek PU 281



Obrázek 27: Distribuce velikosti póru pro vzorek PU 281



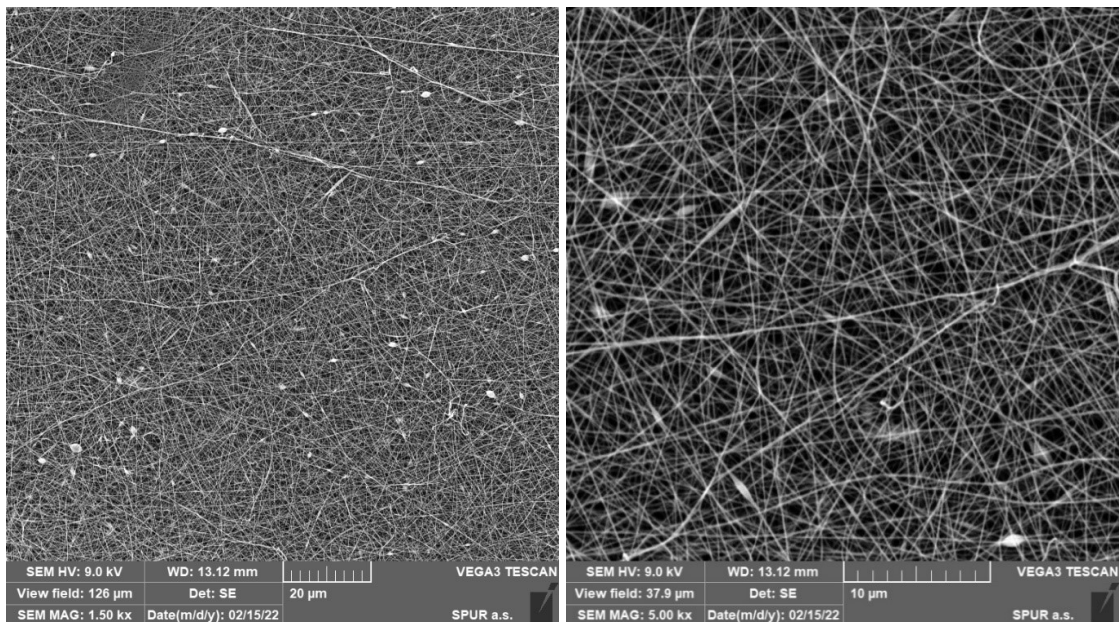
Obrázek 28: Stanovení porovitosti suchý test (modrá přímka) a mokrý test (zelená křivka) pro vzorek PU 220



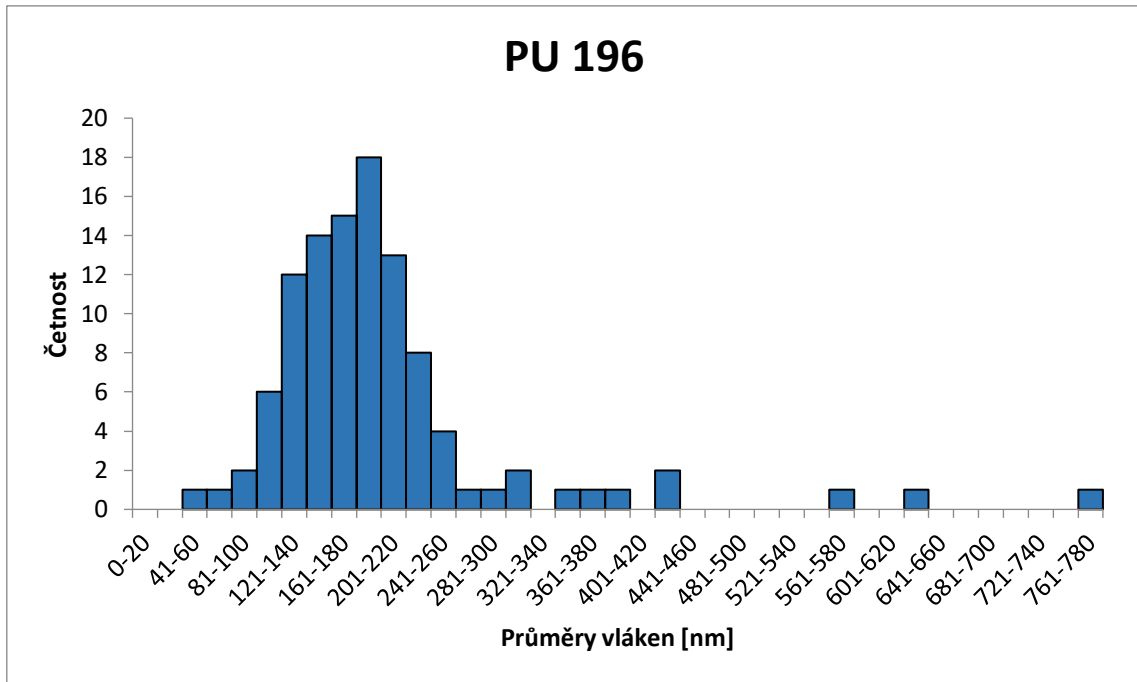
Obrázek 29: Distribuce velikosti póru pro vzorek PU 220

Nanostruktura s malým obsahem beads byla vytvořena i při přípravě PU 196 (obrázek 30) a srovnávána s bez defektní nanostrukturou PU 186 (obrázek 32).

PU 196, $\text{PH} = 1,08 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$

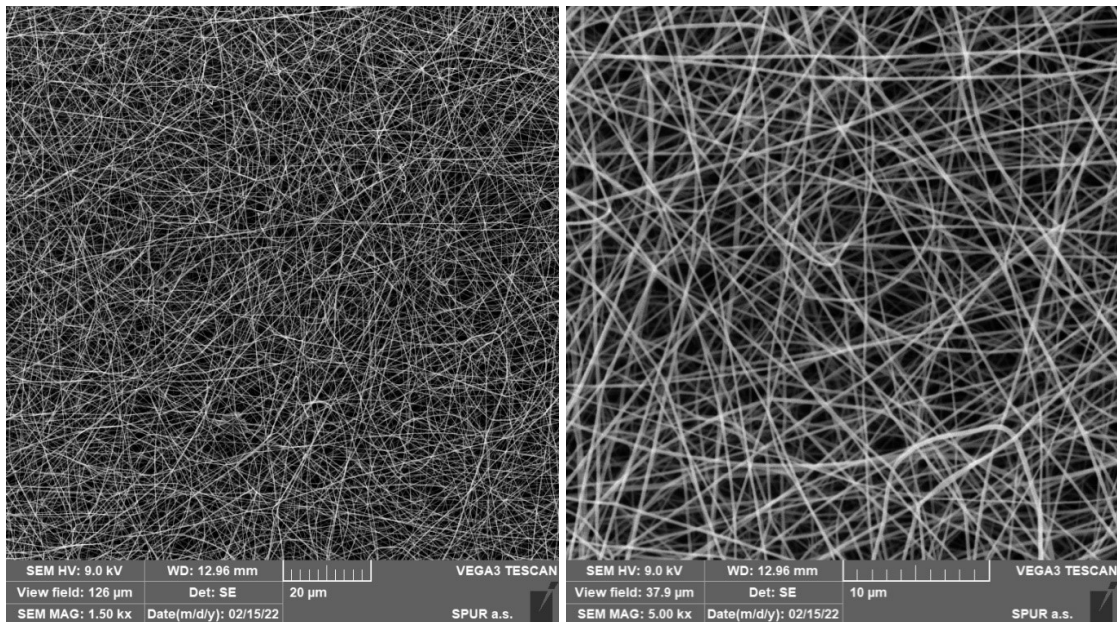


Obrázek 30: Snímky vzorku PU 196 pořízené na SEM při zvětšení 1500x a 5000x

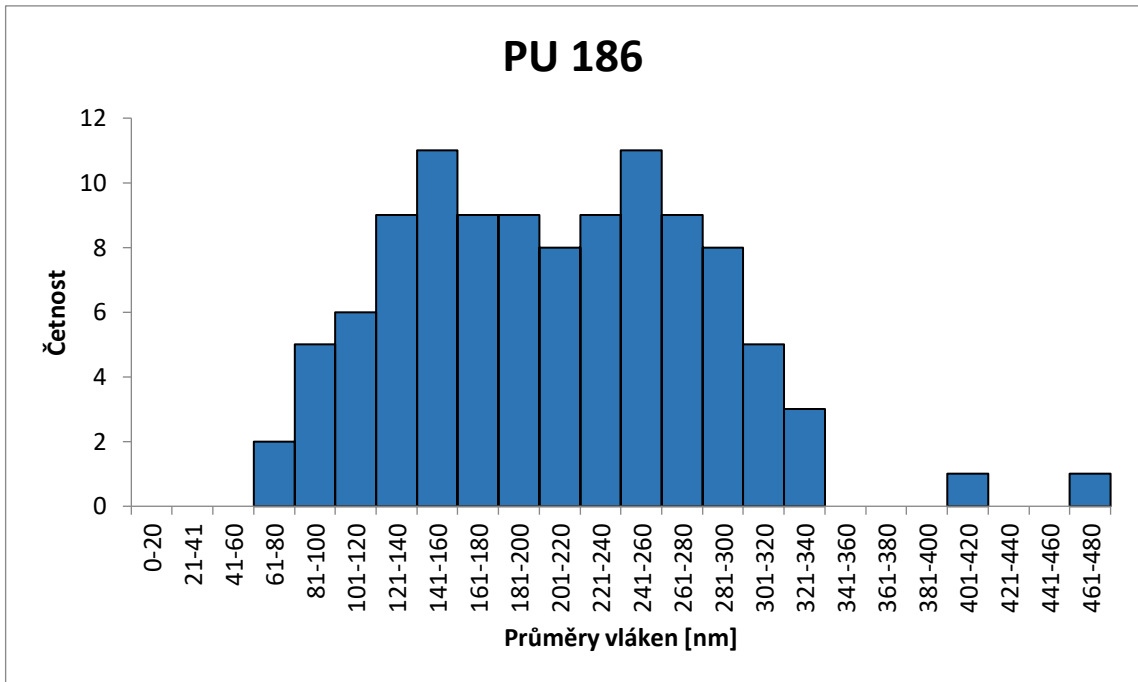


Obrázek 31: Histogram průměrů vláken pro vzorek PU 196

PU 186, PH = 1,02 g·m⁻²

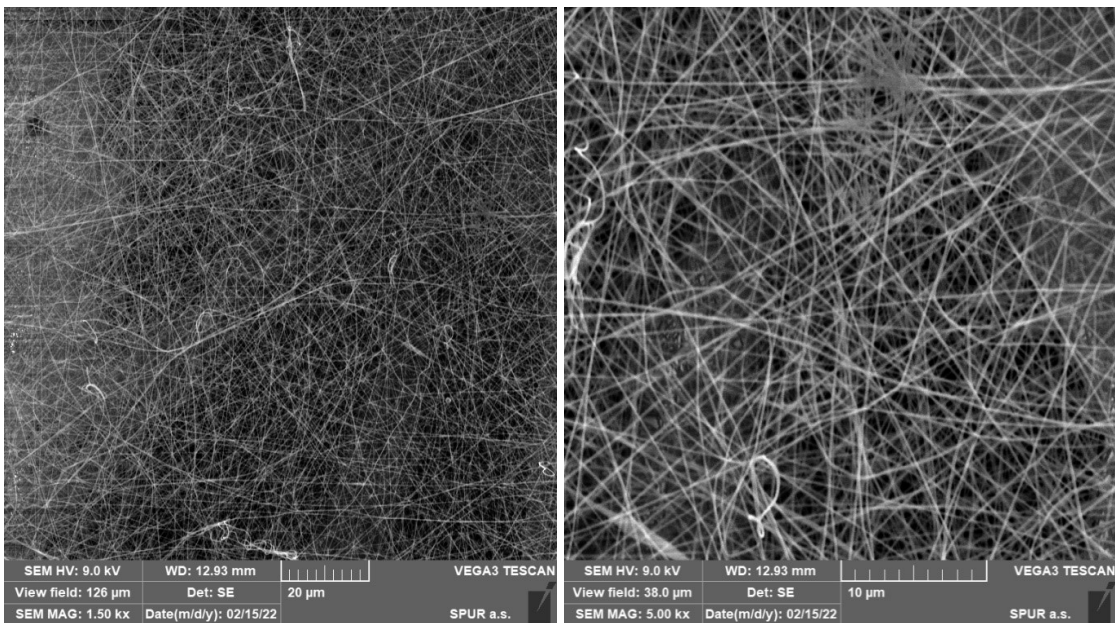


Obrázek 32: Snímky vzorku PU 186 pořízené na SEM při zvětšení 1500x a 5000x

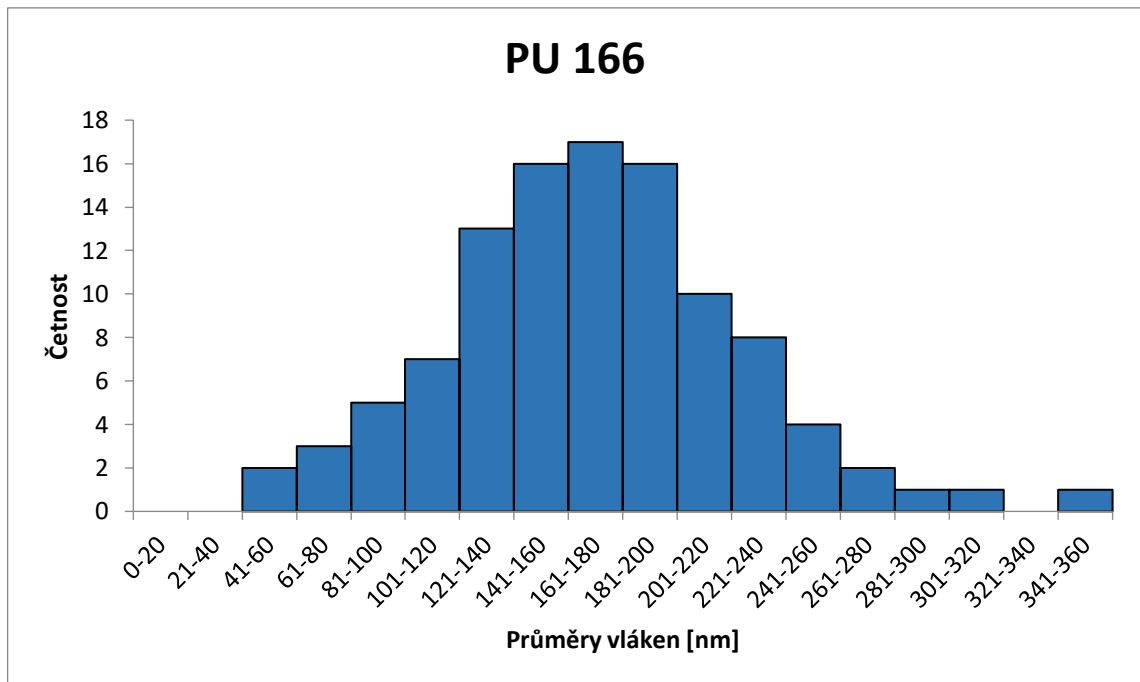


Obrázek 33: Histogram průměrů vláken pro vzorek PU 186

PU 166, PH = 0,47 g·m⁻²

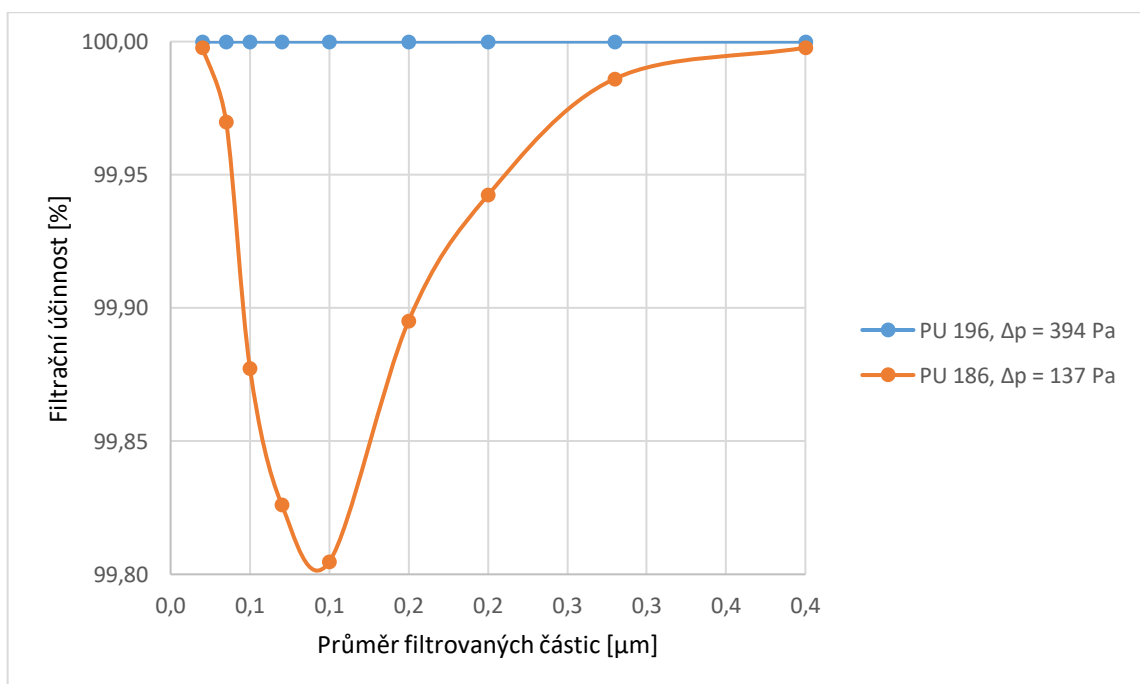


Obrázek 34: Snímky vzorku PU 166 pořízené na SEM při zvětšení 1500x a 5000x



Obrázek 35: Histogram průměrů vláken pro vzorek PU 166

Obdobný výsledek jako byl obdržen při srovnání nanostruktur PU 281 a PU 200, kde elektrická vodivost byla upravována pomocí boraxu a kyseliny citronové, byl obdržen i při srovnání nanostruktur PU 196 (SPP = 420 nm) a PU 186 (SPP = 770 nm), kde elektrická vodivost byla upravována kvarterní amoniovou solí (obrázek 36).

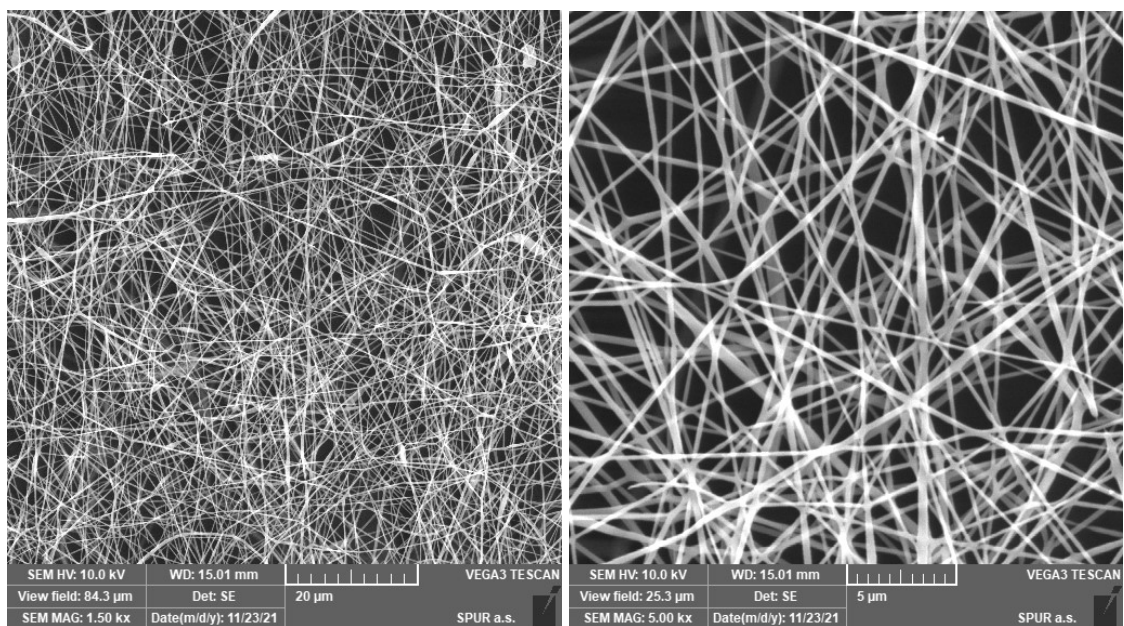


Obrázek 36: Závislost filtrační účinnosti na průměru filtrovaných částic pro vybrané vzorky PU 196 a PU 186

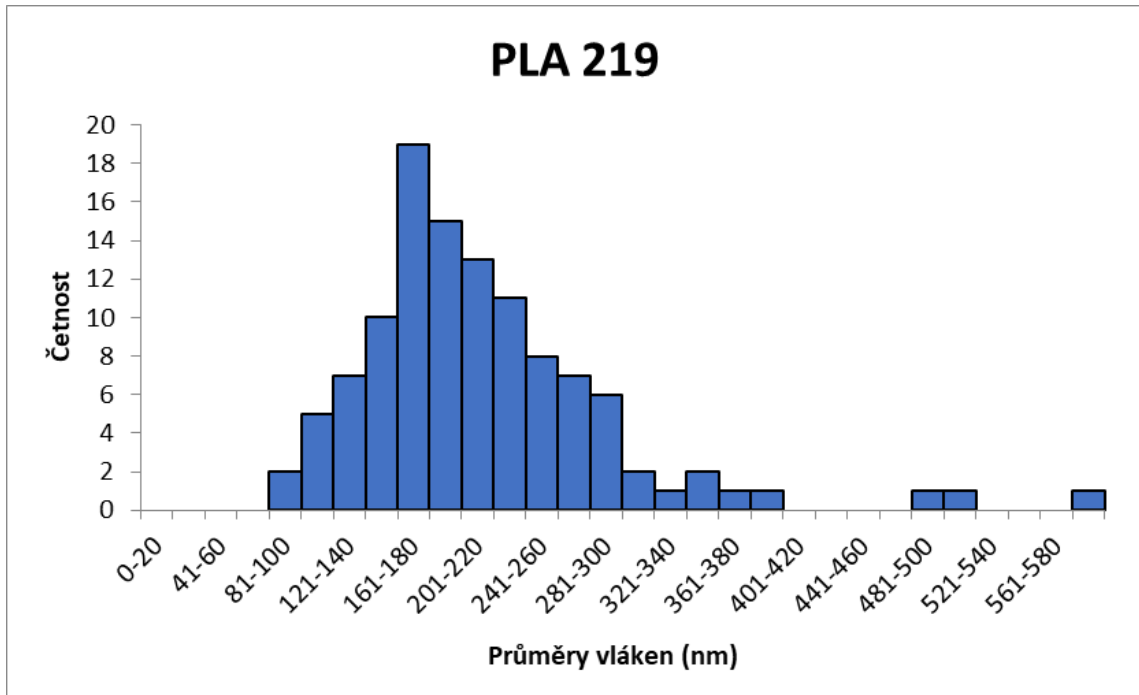
6.2.3 Charakterizace PLA nanostruktur

Hodnocená nanovlákna mají přibližně stejný průměr, protože při jejich přípravě byla měněna jen rychlost posuvu sběrného substrátu. Všechny dosažené střední průměry pórů (SPP) byly vyšší než 1000 nm. S rostoucí PH v řadě 5 vzorků roste FE i Δp . V následujícím přehledu SEM snímků a histogramů velikostí průměrů vláken jsou PLA nanostruktury seřazeny dle rostoucích velikostí plošných hmotností. Faktory kvality u všech nanostruktur jsou přibližně stejné.

PLA 219, PH = 0.28 g·m⁻²

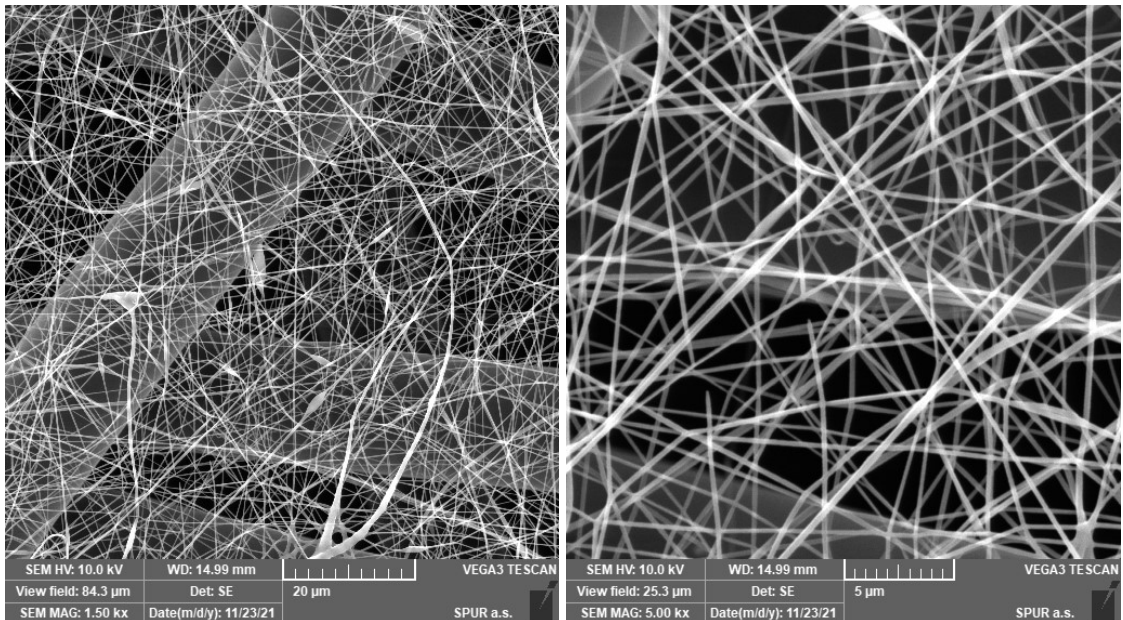


Obrázek 37: Snímky vzorku PLA 219 pořízené na SEM při zvětšení 1500x a 5000x

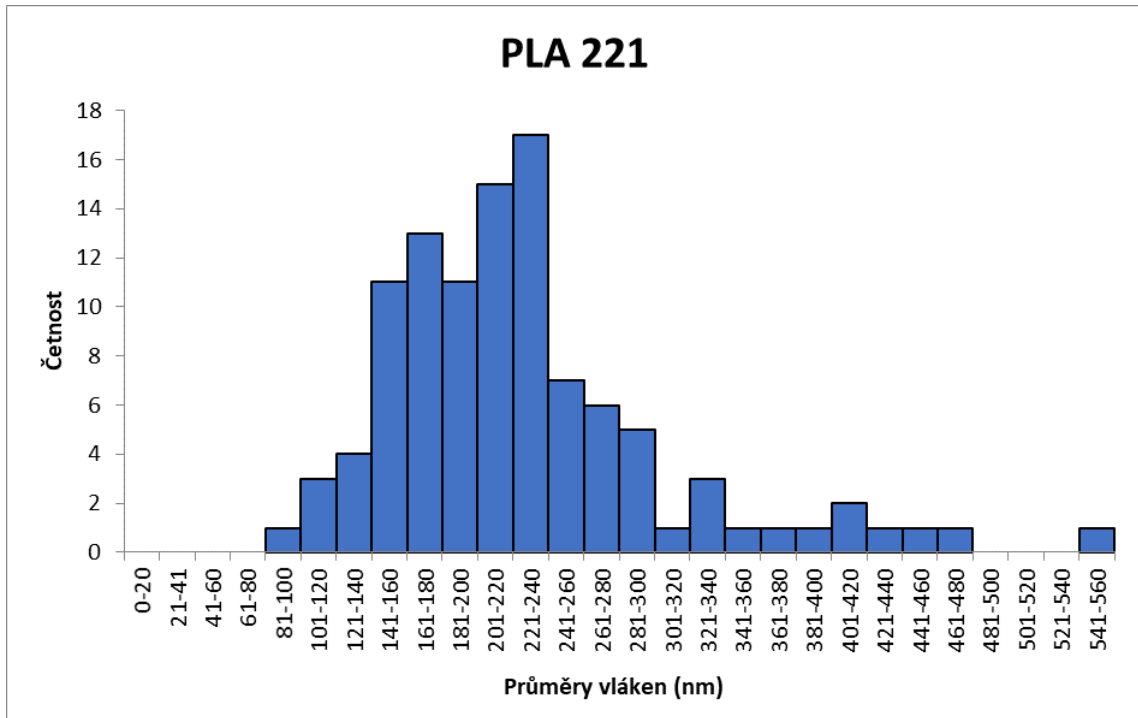


Obrázek 38: Histogram průměrů vláken pro vzorek PLA 219

PLA 221, PH = 0.33 g·m⁻²

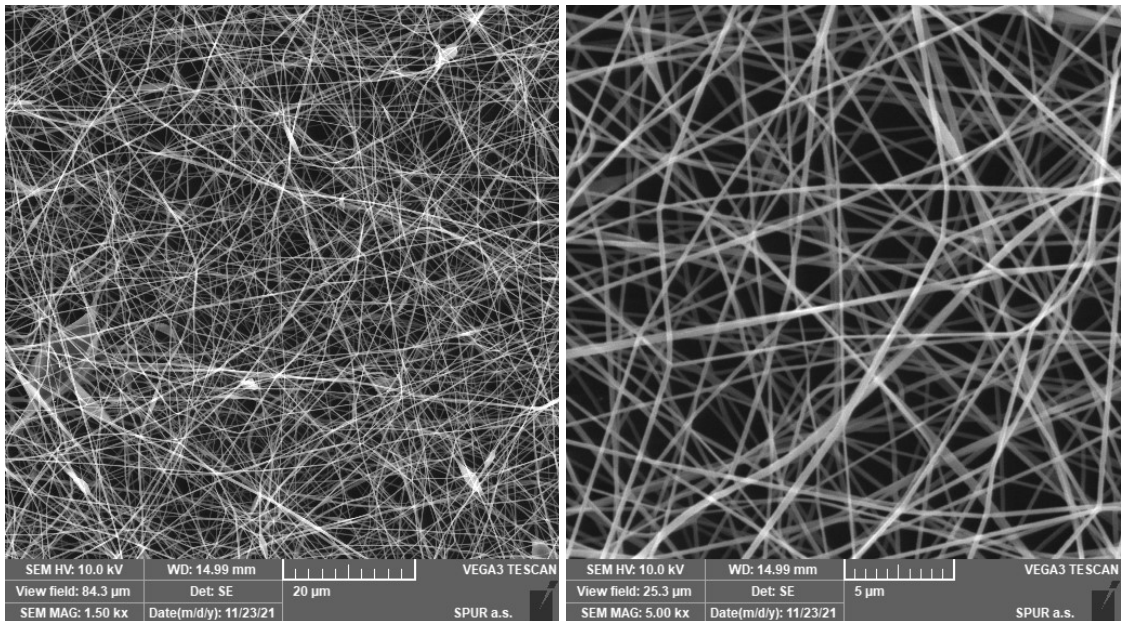


Obrázek 39: Snímky vzorku PLA 221 pořízené na SEM při zvětšení 1500x a 5000x

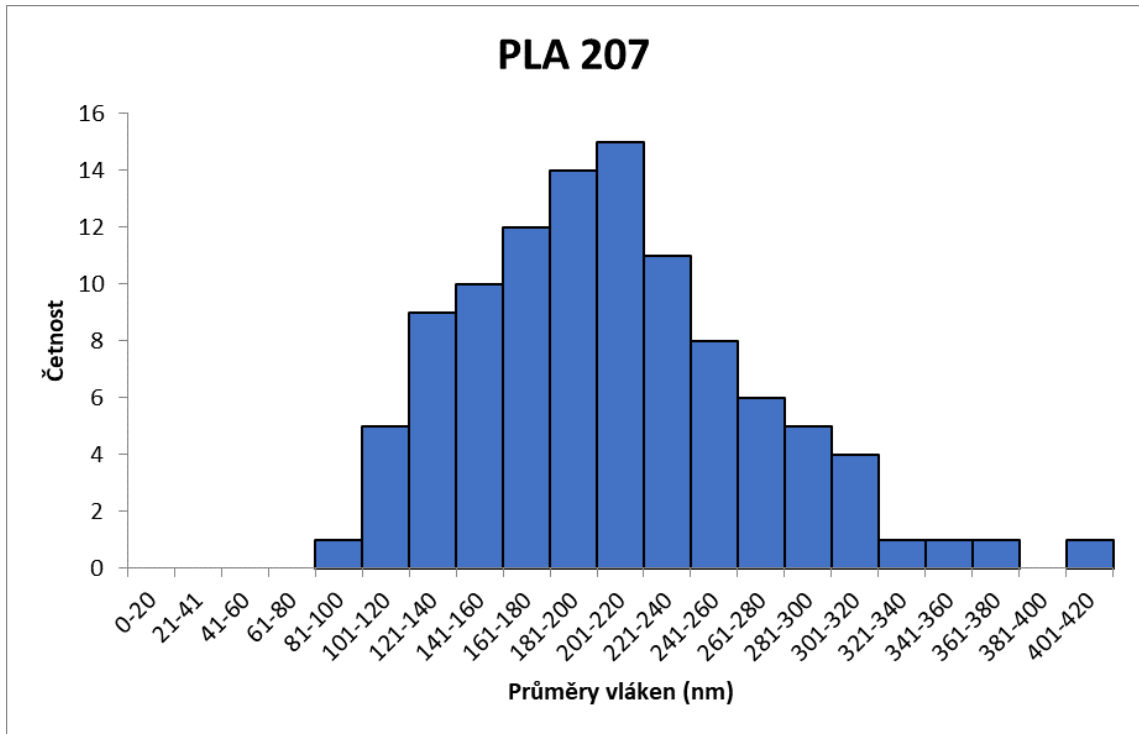


Obrázek 40: Histogram průměrů vláken pro vzorek PLA 221

PLA 207, PH = 0.42 g·m⁻²

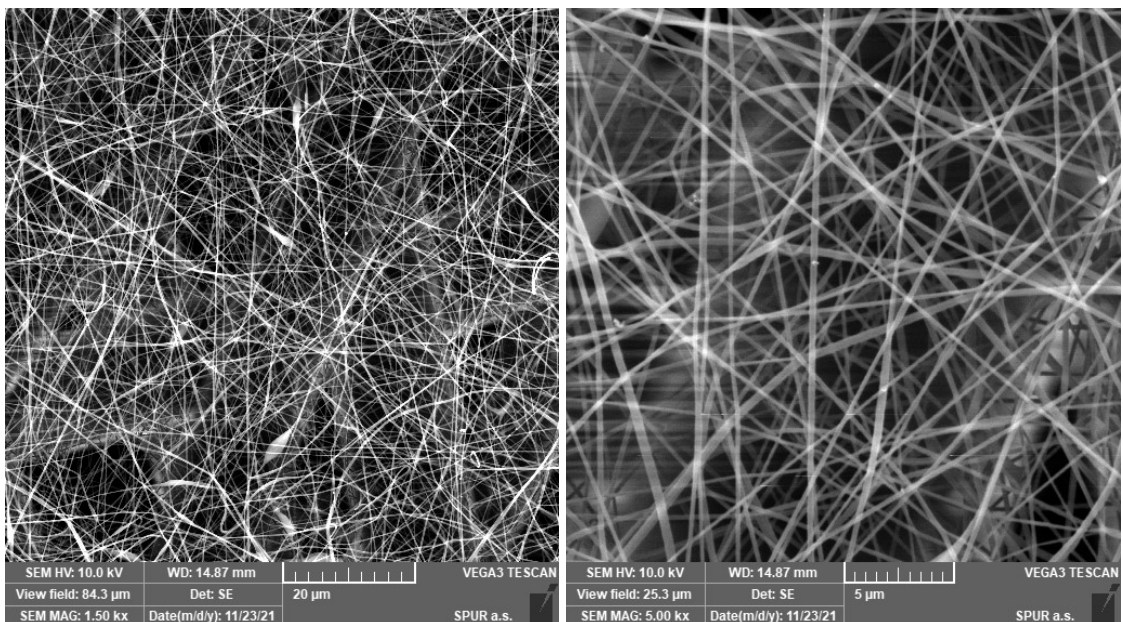


Obrázek 41: Snímky vzorku PLA 207 pořízené na SEM při zvětšení 1500x a 5000x

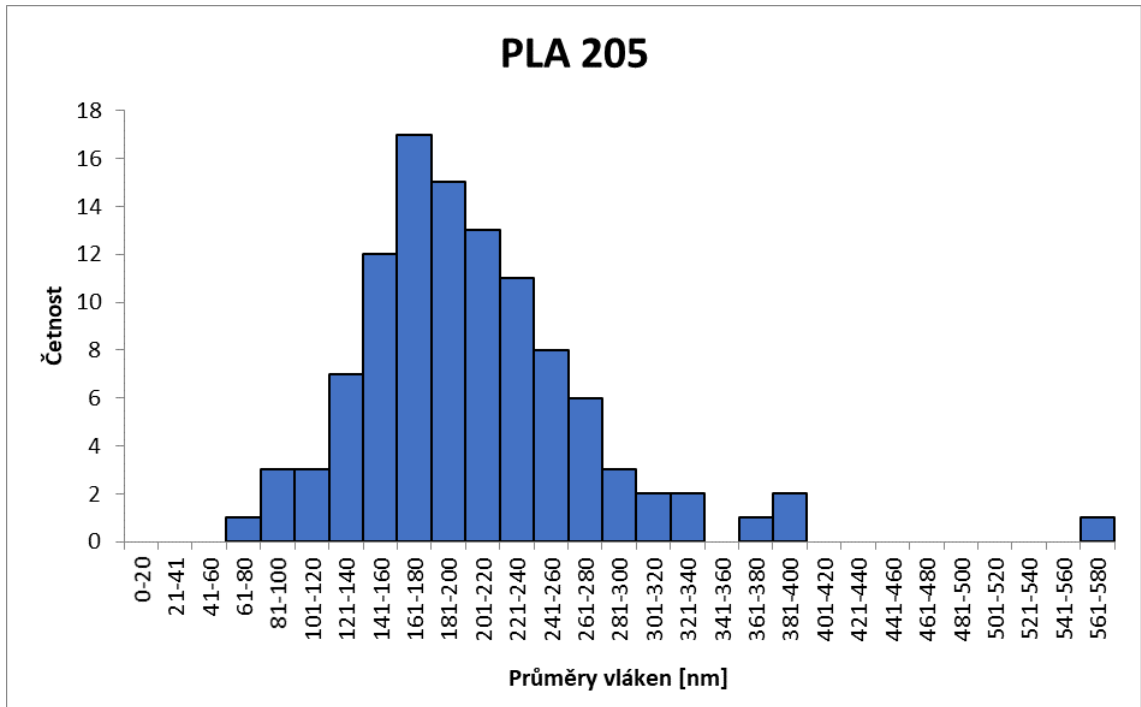


Obrázek 42: Histogram průměrů vláken pro vzorek PLA 207

PLA 205, PH = 0.56 g·m⁻²

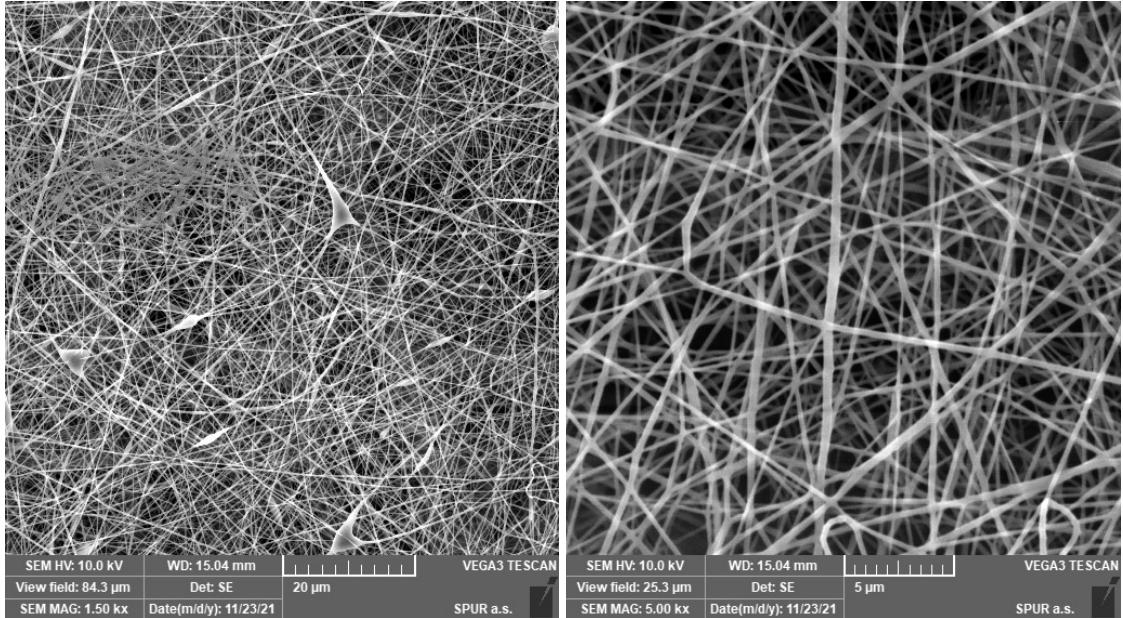


Obrázek 43: Snímky vzorku PLA 205 pořízené na SEM při zvětšení 1500x a 5000x

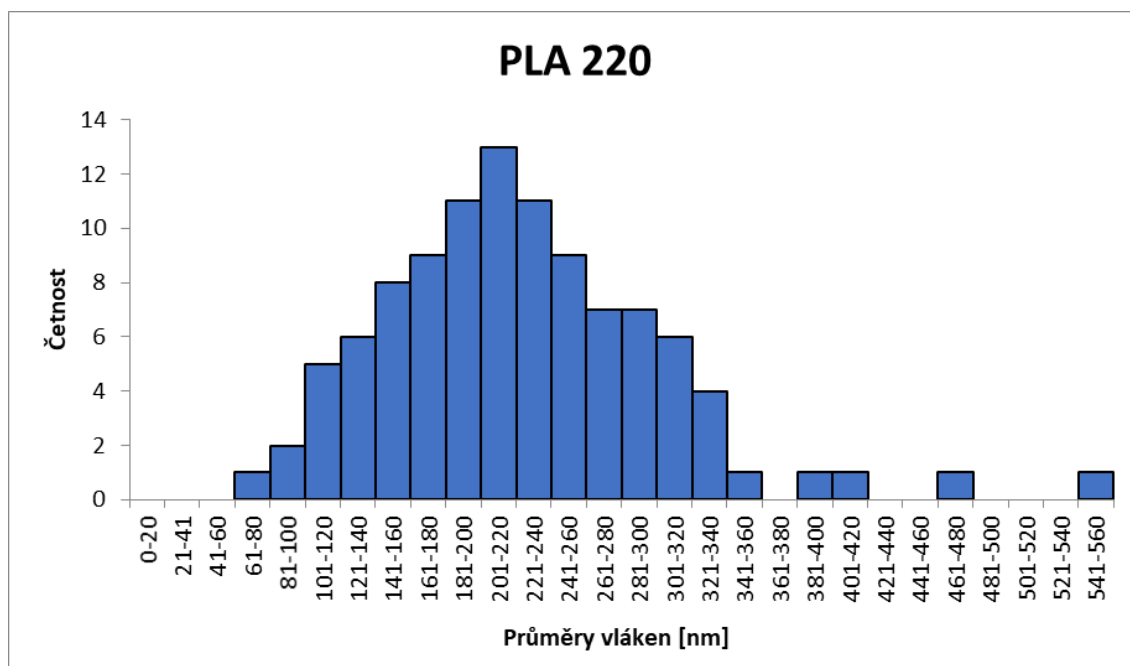


Obrázek 44: Histogram průměrů vláken pro vzorek PLA 205

PLA 220, PH = 0.62 g·m⁻²



Obrázek 45: Snímky vzorku PLA 220 pořízené na SEM při zvětšení 1500x a 5000x



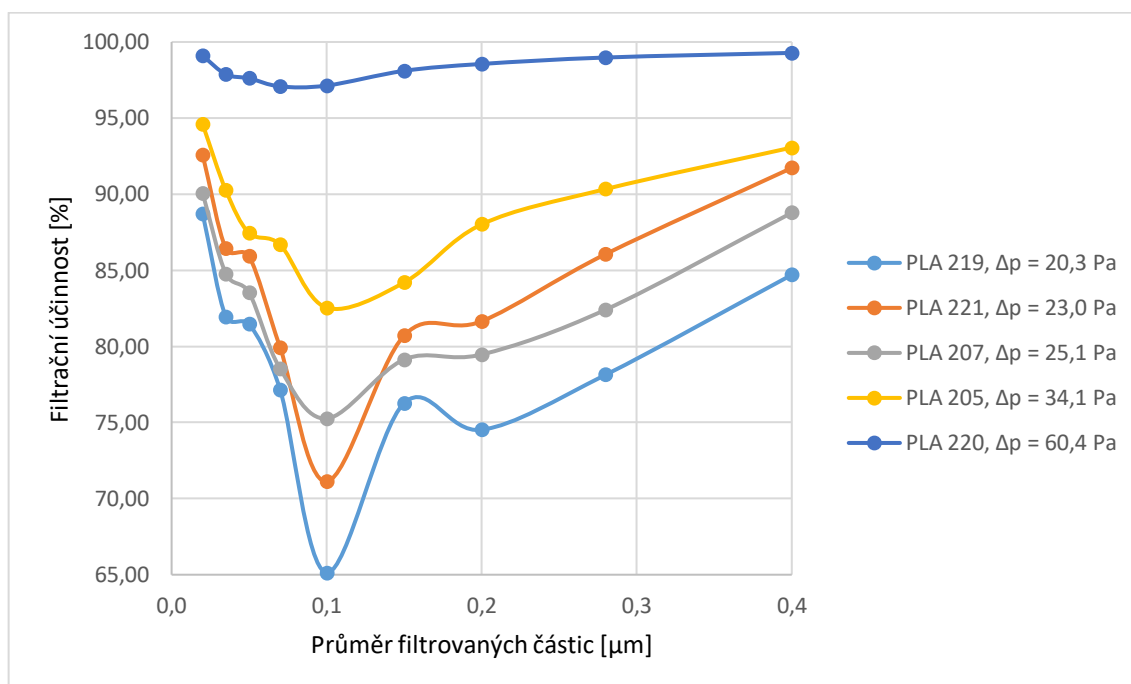
Obrázek 46: Histogram průměrů vláken pro vzorek PLA 220

Tabulka 6: Charakterizace PLA nanostruktur, sumarizace proměnných ovlivňujících morfologii nanostruktur

Označení nanostruktury	PLA 219	PLA 221	PLA 207	PLA 205	PLA 220
Plošná hmotnost nanostruktury [g·m ⁻²]	0,28	0,33	0,42	0,56	0,62
Rychlost posunu sběrného substrátu [m·min ⁻¹]	0,575	0,490	0,400	0,316	0,225
Střední hodnota průměru vláken [nm]	219	221	207	205	220
Nejčtetnější interval průměrů vláken [nm]	161-180	221-240	201-220	161-180	201-220
Střední průměr pórů [μm]	1,20	1,02	1,11	1,35	1,44
Maximální průměr póru [nm]	1,60	1,40	1,50	1,70	1,80
Permeabilita pro suchý vzduch [l·min ⁻¹ ·bar ⁻¹ ·cm ⁻²]	-	-	-	357	383
Filtrační účinnost v MPPS [%]	65,13	71,12	76,8	82,54	97,08
Tlaková ztráta [Pa]	20,2	23,0	25,1	34,1	60,4
Faktor kvality [kPa ⁻¹]	52,16	54,00	58,21	51,18	58,50

PLA nanostruktury jsou tvořeny velkými póry a mají velkou permeabilitu pro vzduch. Lze tedy u nich očekávat dosažení nízkých tlakových ztrát, přičemž FE záchyty submikronových částic zůstane vysoká (Brownův pohyb). PLA struktury jsou ve srovnání s PU tvořeny tlustšími nanovláknky a jsou prostornější o čemž svědčí i vyšší hodnoty průměrů pórů a maximálních průměrů pórů.

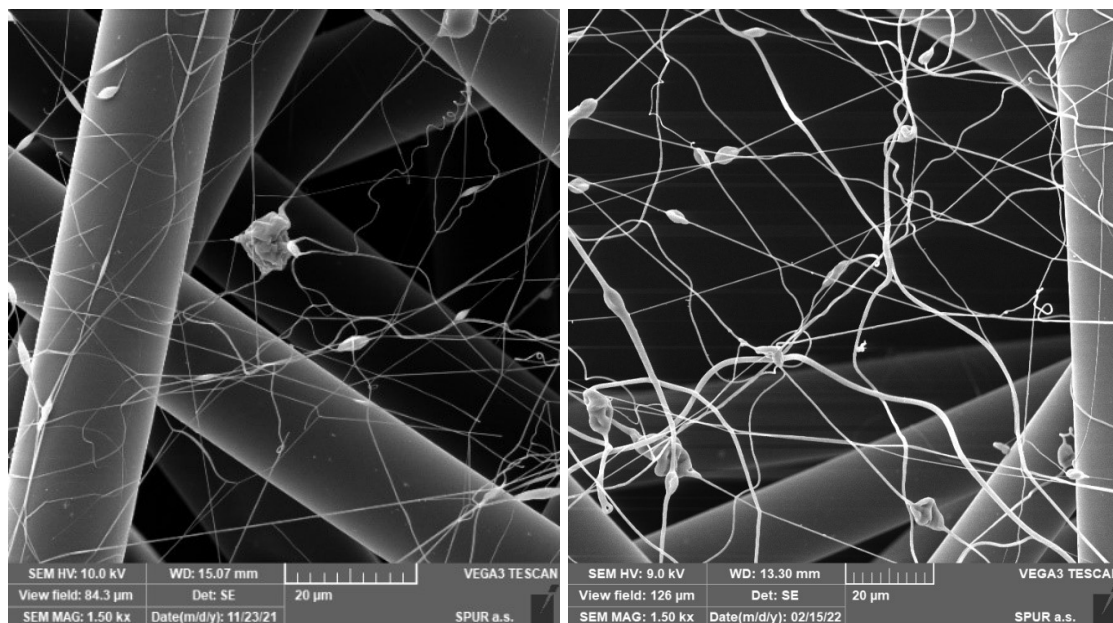
Závislosti filtračních účinností na průměru filtrovaných submikronových částic jsou prezentovány na obrázku 47. Další PLA nanostruktury diskutované později byly připraveny vrstvením těchto základních nanostruktur.



Obrázek 47: Závislost filtrační účinnosti na průměru filtrovaných částic pro vzorky PLA

6.2.4 Charakterizace PBS nanostruktur

V úvodní studii při zvlákňování na trnu, kde byla hodnocena kvalita nanovláken s rostoucí elektrickou vodivostí roztoku, bylo pozorováno u vzorků připravených při nízkých elektrických vodivostech vznik větvených struktur s globulárními defekty a beads (obrázek 48). Tyto struktury se tvořily jak při zvlákňování PLA, tak i PBS. Defekty na následujících snímcích mohou vést buď ke vzniku rozvětvených struktur, kdy z globulárního útvaru vychází několik nanovláken a/nebo se jedná o klasické beads, které leží na jednom nanovlákně a vznikly nedostatečným dloužením v elektrostatickém poli. Na těchto nanostrukturách je zajímavé, že jsou tvořena velmi jemnými vlákny a mohly by být hledanou cestou pro zvýšení filtrační účinnosti při sníženém tlakovém odporu.



Obrázek 48: Snímek vzorku PLA ($\chi = 3,22 \mu\text{S}/\text{cm}$) při zvětšení 5000x (vlevo) a snímek vzorku PBS ($\chi = 16,82 \mu\text{S}/\text{cm}$) při zvětšení 5000x (vpravo) pořízené na SEM

PLA i PBS jsou biodegradovatelné polymery a jejich vláknovitost je zajímavá i z hlediska potencionálních průmyslových aplikací.

S cílem připravit kombinaci tlustých útvarů a tenkých vláken v nanostruktúře a tedy materiál s větší tloušťkou jsme zvlákňovali 12 % PBS roztok s viskozitou $\eta = 0,4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ a elektrickou vodivostí $\chi = 17,8 \mu\text{S}/\text{cm}$ při napětí $U = 60 \text{ kV}$ a posunu sběrného substrátu $v = 0,1 \text{ m}/\text{min}$. Částečně zvýšené elektrické vodivosti bylo dosaženo přidavkem boraxu a kyseliny citronové rozpuštěnými v DMF. Sledovanou proměnou bylo jen dávkování roztoku do elektrostatického pole.

Tabulka 7: Charakterizace PBS nanostruktur, sumarizace proměnných ovlivňujících morfologii nanostruktury a filtrační vlastnosti

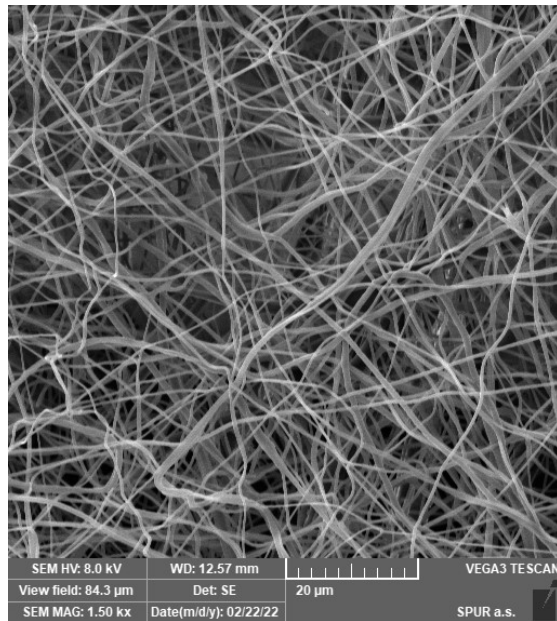
Označení struktury	PBS 599	PBS 1500
Plošná hmotnost nanostruktury [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$]	3,5	6,3
Dávkování roztoku [$\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$]	0,68	1,03
Střední hodnota průměru vláken [nm]	599	1500
Nejčtenější interval průměrů nanovláken [nm]	301 - 400	801-900
Střední průměr pórů [nm]	2 630	2 760
Maximální průměr póru [nm]	4 000	4 600
Permeabilita pro suchý vzduch [$\text{l}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$]	451	502
FE v MPPS [%]	46,0	93,5
Tlaková ztráta [Pa]	17,9	86,8
Faktor kvality [kPa^{-1}]	34,42	31,49

Vláknotvorný proces byl uskutečněn s roztokem s nižší elektrickou vodivostí $\chi = 17.8 \mu\text{S}/\text{cm}$, při kterých se vedle mikrovláken tvoří i nanovlákná a/nebo při kterých se mezi silnými vlákny za vhodných podmínek vytahují nanosítě. Tento cíl se nám ale nepodařilo dosáhnout. Střední průměrné velikosti pórů bohužel nebylo možné stanovit porometricky. Změnou procesních podmínek (napětí a dávkování roztoku) byly připraveny materiály s různou plošnou hmotností, které byly podrobeny TSI analýze (tabulka 8) Dosažené plošné hmotnosti mikrovláknových struktur byly v intervalu 3.5 až 6.3 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$. Vypočtené faktory kvality jsou u těchto struktur (na hranici mezi mikro a nanovláknitými) nižší než u PU a PLA.

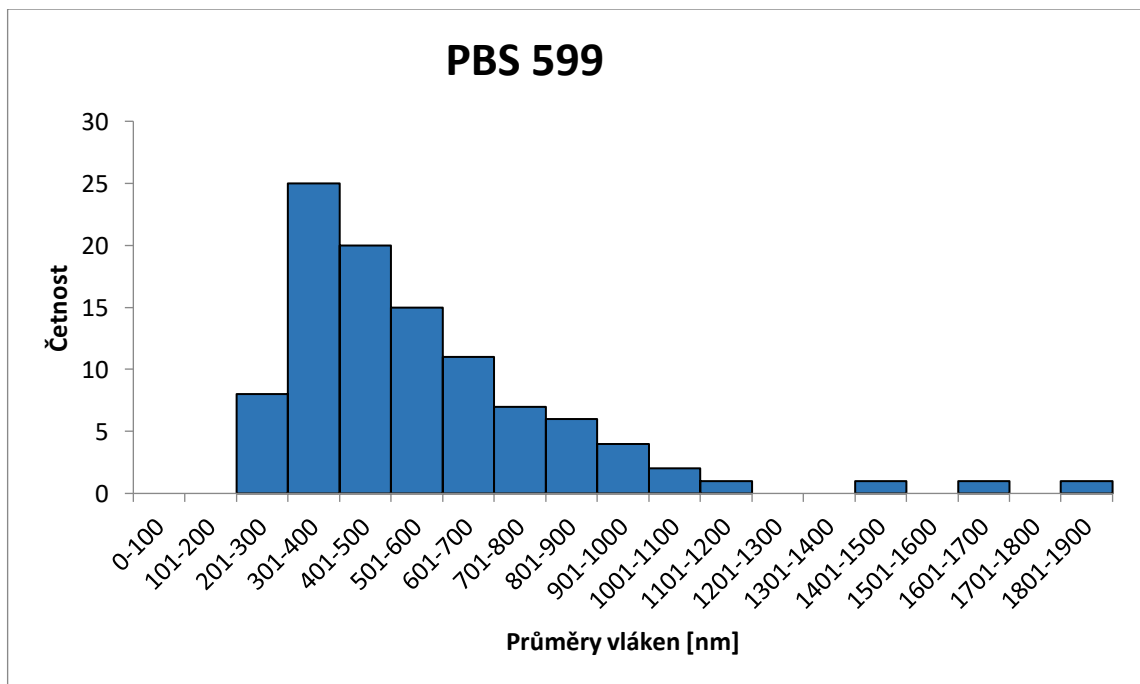
Tabulka 8: Charakterizace PBS s $\chi = 17.8 \mu\text{S}/\text{cm}$

Označení struktury	PBS					
Plošná hmotnost nanostruktury [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$]	3,5	4,1	4,3	4,8	5,4	6,3
FE v MPPS [%]	46,0	60,5	66,4	83,6	88,0	93,5
Tlaková ztráta [Pa]	17,9	33,9	38,8	48,9	65,5	86,8
Faktor kvality [kPa^{-1}]	34,42	27,4	28,11	36,97	32,37	31,49

PBS 599, PH = 3,5 g·m⁻²

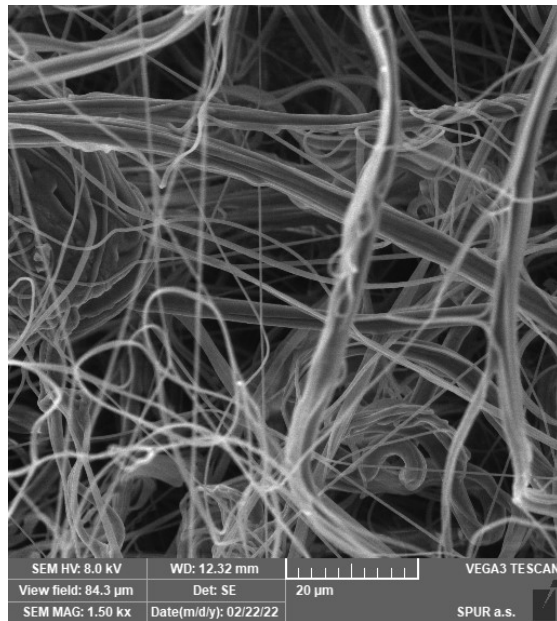


Obrázek 49: Snímek vzorku PBS 599 pořízené na SEM při zvětšení 1500x

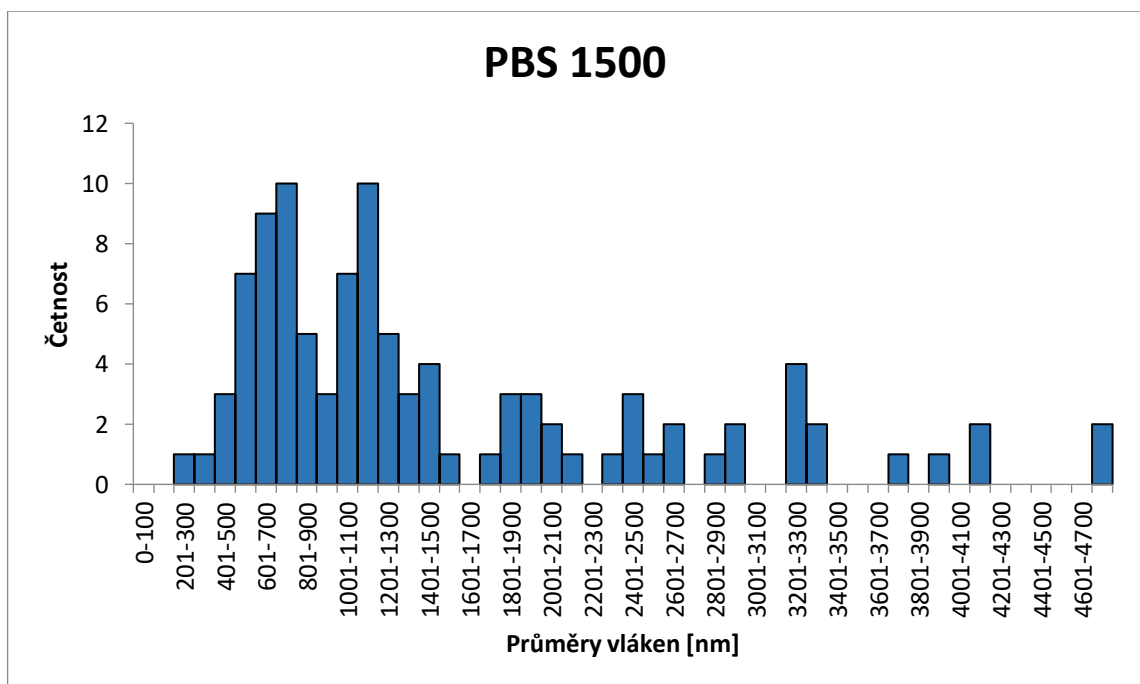


Obrázek 50: Histogram průměrů vláken pro vzorek PBS 599

PBS 1500, PH = 6,3 g·m⁻²



Obrázek 51: Snímek vzorku PBS 1500 pořízené na SEM při zvětšení 1500x



Obrázek 52: Histogram průměrů vláken pro vzorek PBS 1500

Tenká nanovlákná ani nanosítě se nám mezi ztužujícími mikrovláknými nepodařilo vytvořit. Nicméně filtrační vlastnosti připravené série PBS struktur bude zajímavé porovnat s nanostrukturami z PLA, PU a PBS/PU. (obrázek 68)

6.2.5 Charakterizace PBS/PU nanostruktur

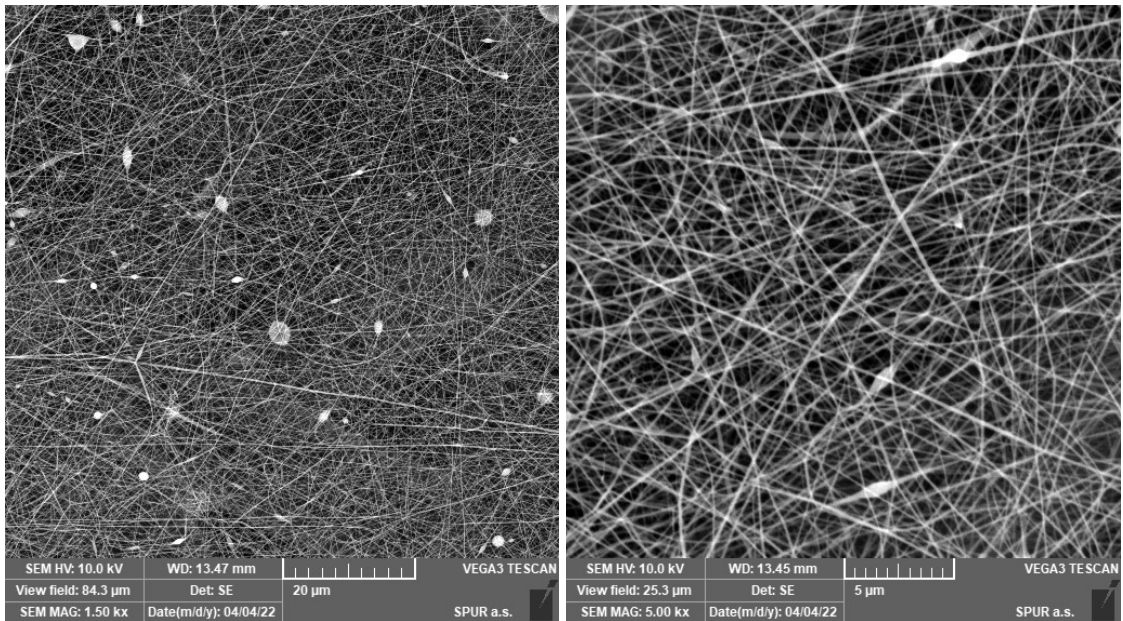
S představou přípravy struktur obsahujících tlustá a tenká vlákna byla elektrospinningem zvláknována směs PBS a PU polymerů. Zpracování směsi PBS a PU v elektrostatickém poli vede k nanostrukturám s obsahem defektů v nanostruktuře, (např. obrázek 53), širokou distribucí vláken a nízkými hodnotami středního průměru pórů. Materiály označené 2x byly připraveny položením dvou nanostruktur na sebe.

Tabulka 9: Charakterizace PBS/PU nanostruktur, sumarizace proměnných ovlivňujících morfologii nanostruktury a filtrační vlastnosti

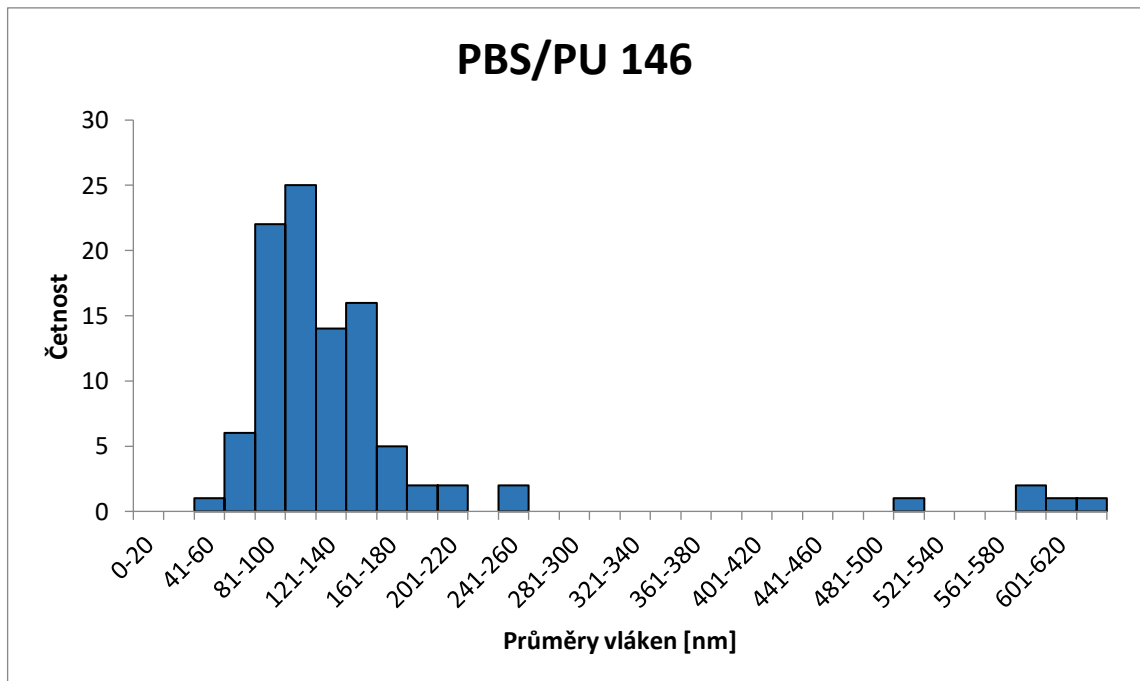
Označení nanostruktury	PBS/PU 146	PBS/PU 173	PBS/PU 146 2x	PBS/PU 153	PBS/PU 162	PBS/PU 153 2x	PBS/PU 162 2x
Plošná hmotnost nanostruktury [g·m ⁻²]	0,18	0,29	0,36	0,54	0,68	1,08	1,36
Střední hodnota průměru vláken [nm]	146	173	146	153	162	153	162
Střední průměr pórů [nm]	450	440	450	440	380	380	380
Maximální průměr póru [nm]	650	600	650	600	450	450	450
Filtrační účinnost v MPPS [%]	98,50	99,60	99,62	96,20	96,85	99,97	99,999
Tlaková ztráta [Pa]	95,76	119,22	125,88	67,58	174,37	149,75	364,18
Faktor kvality [kPa ⁻¹]	43,86	46,31	44,27	48,39	19,83	54,17	31,61

Přestože nanostruktury z PBS/PU obsahují globulární defekty a beads ve svých strukturách, mají ve srovnání s PLA a PU nanovláknky vyšší podíl velmi jemných vláken (pod 100 nm), takže střední hodnoty průměrů vláken jsou nižší než u PLA a PU, což pozitivně ovlivňuje filtrační účinnost. V důsledku přítomnosti velmi jemných vláken je ale přesné srovnání s filtračními vlastnostmi PU a PLA struktur obtížné.

PBS/PU 146, PH = 0,18 g·m⁻²

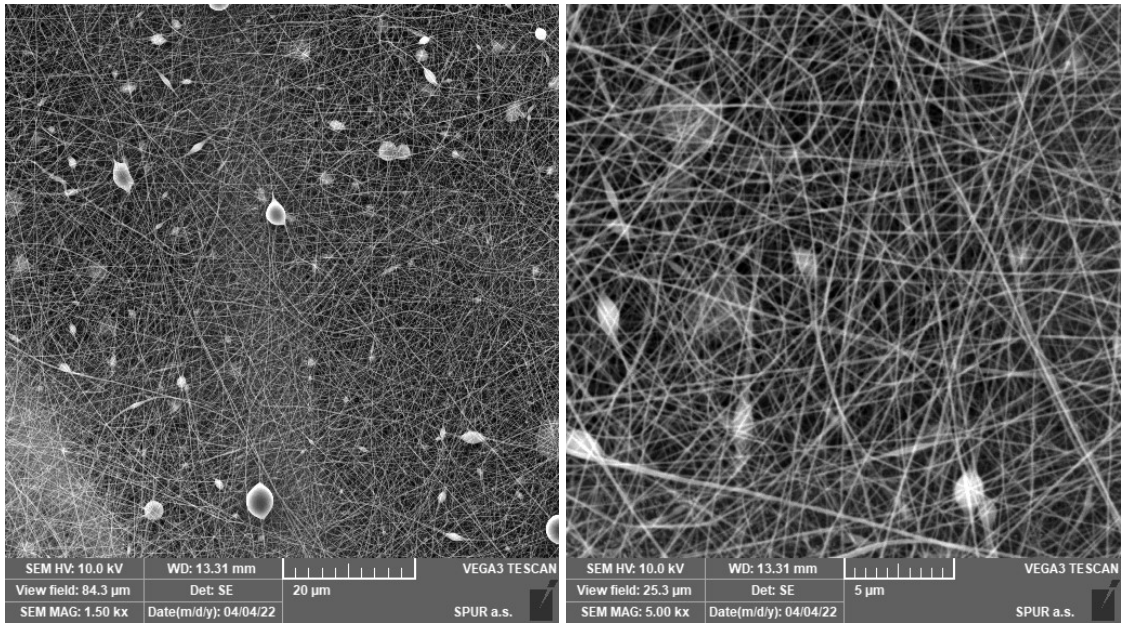


Obrázek 53: Snímky vzorku PBS/PU 146 pořízené na SEM při zvětšení 1500x a 5000x

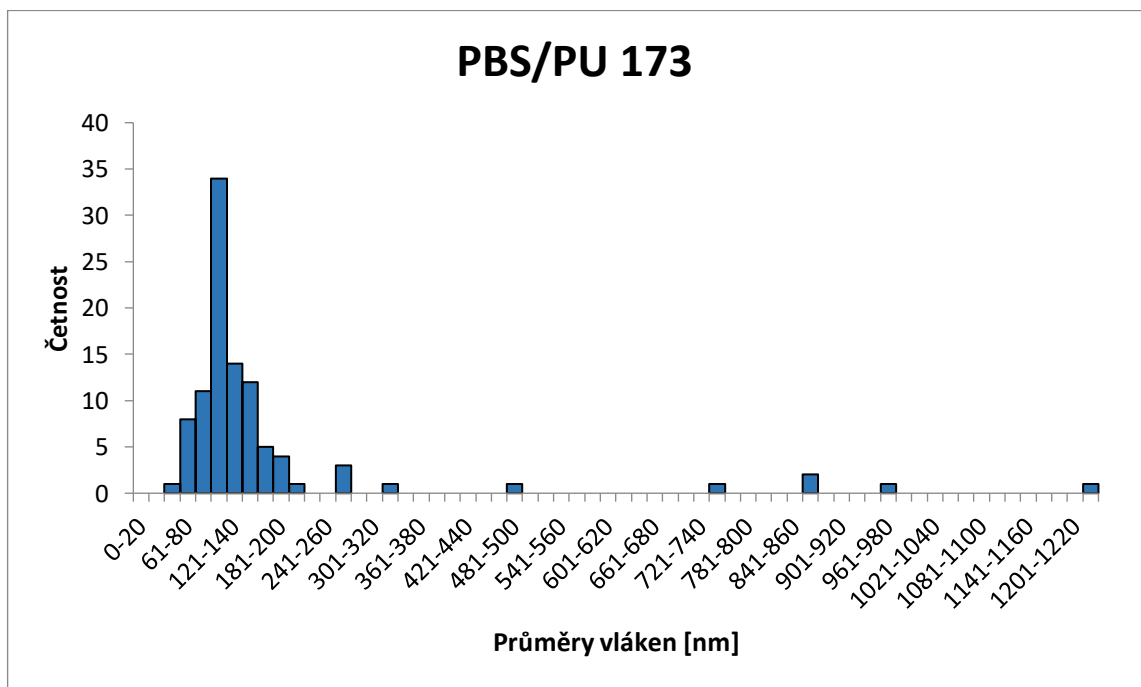


Obrázek 54: Histogram průměrů vláken pro PBS/PU 146

PBS/PU 173, PH = 0,29 g·m⁻²

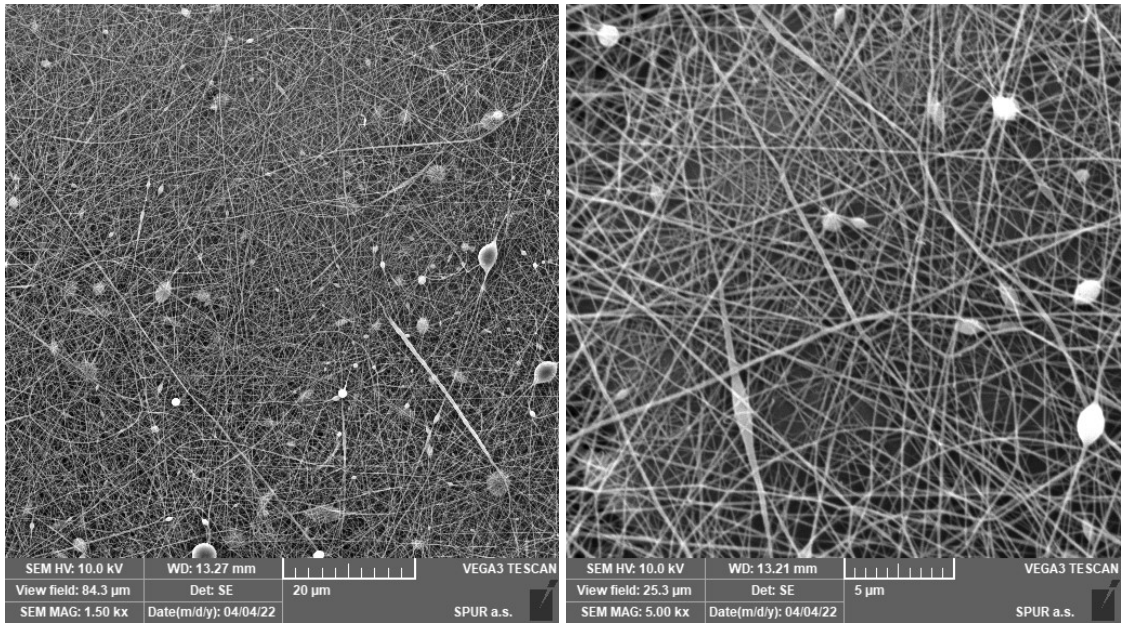


Obrázek 55: Snímky vzorku PBS/PU 173 pořízené na SEM při zvětšení 1500x a 5000x

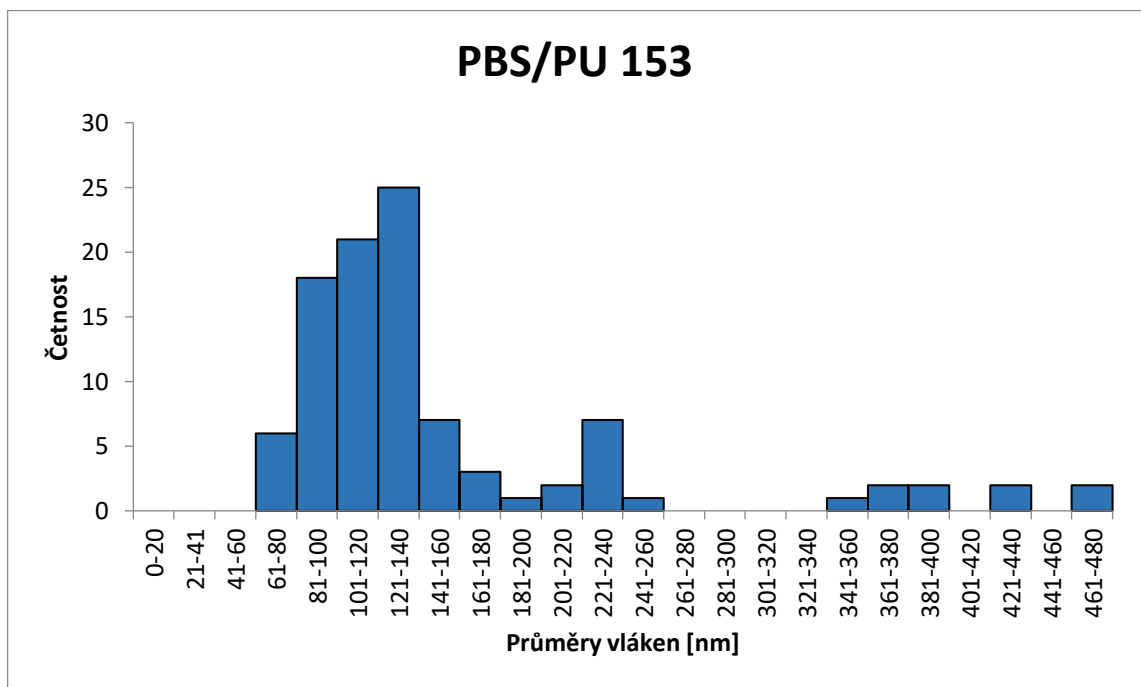


Obrázek 56: Histogram průměrů vláken pro vzorek PBS/PU 173

PBS/PU 153, PH = 0,54 g·m⁻²

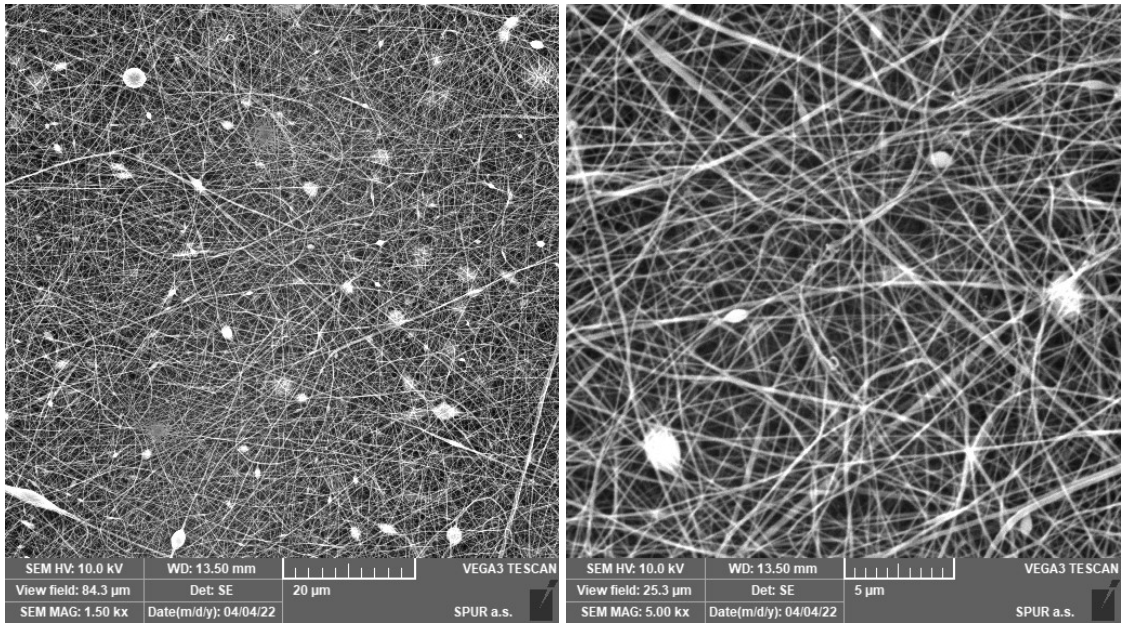


Obrázek 57: Snímky vzorku PBS/PU 153 pořízené na SEM při zvětšení 1500x a 5000x

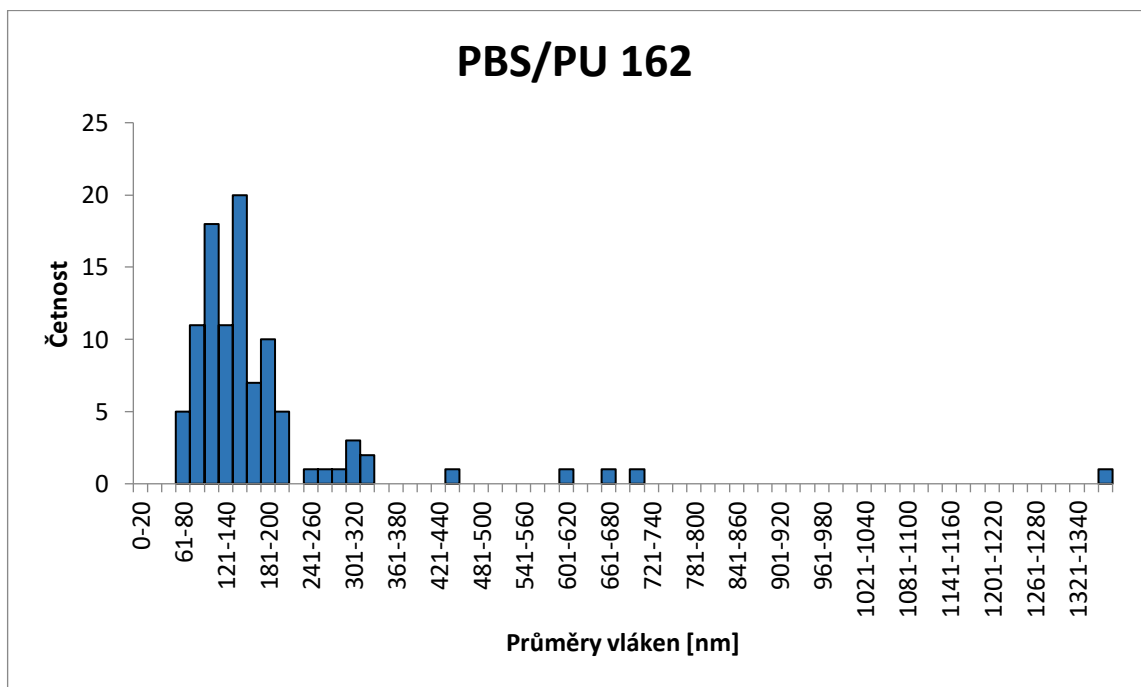


Obrázek 58: Histogram průměrů vláken pro vzorek PBS/PU 153

PBS/PU 162, PH = 0,68 g·m⁻²

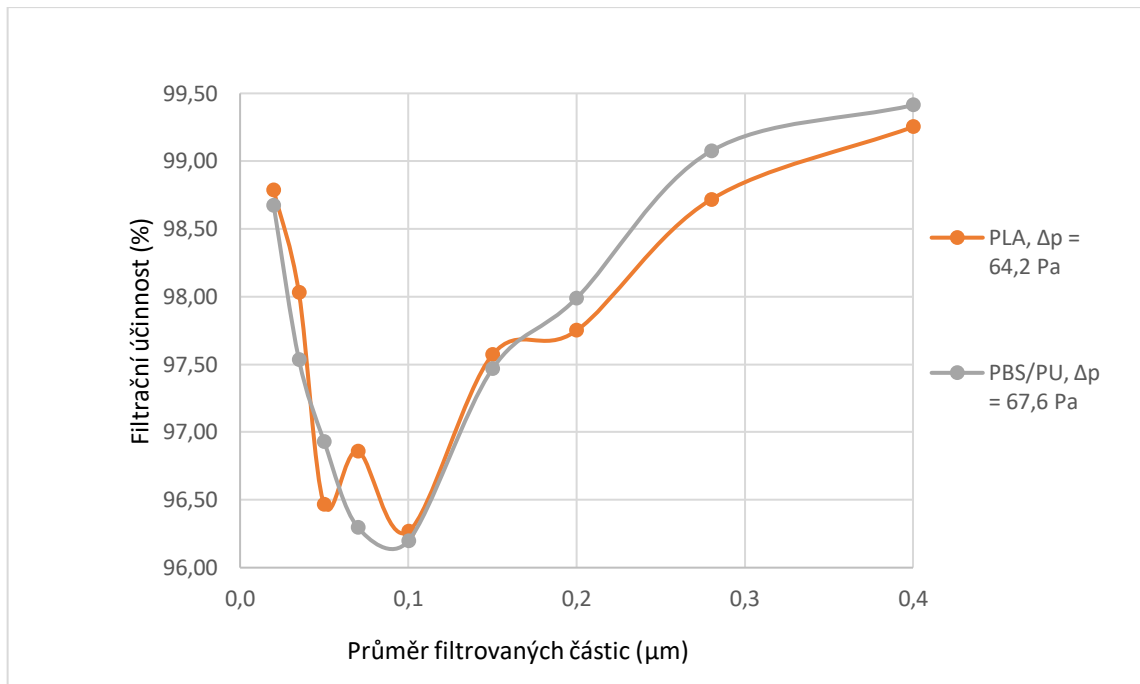


Obrázek 59: Snímky vzorku PBS/PU 162 pořízené na SEM při zvětšení 1500x a 5000x

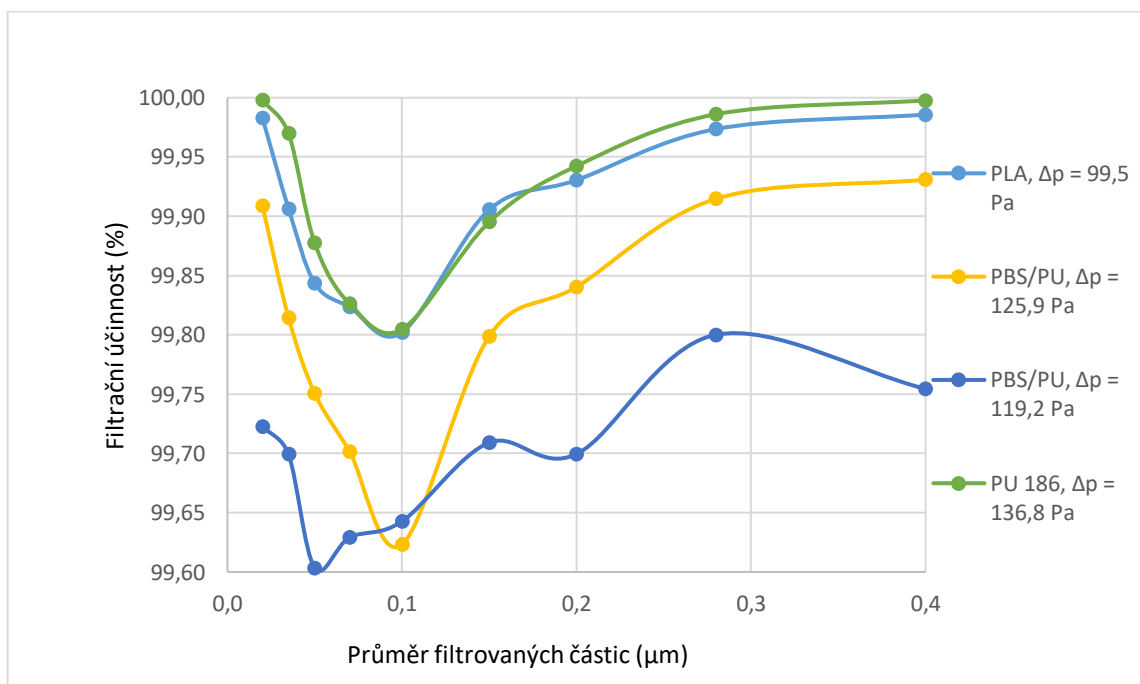


Obrázek 60: Histogram průměru vláken pro vzorek PBS/PU 162

6.2.6 Filtrační vlastnosti PU, PLA, PBS a PU/PBS nanostruktur



Obrázek 61: Závislost filtrační účinnosti na průměru filtrovaných částic pro vzorky PLA a PBS/PU



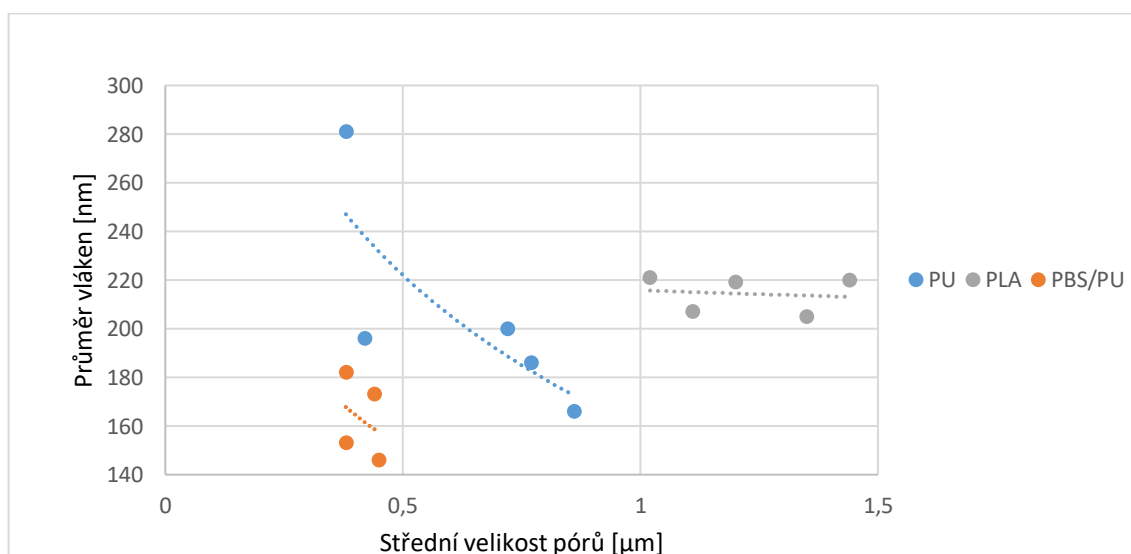
Obrázek 62: Závislost filtrační účinnosti na průměru filtrovaných částic pro vzorky PLA, PBS/PU a PU

Při srovnávání filtračních vlastností nanostruktur je žádoucí, aby jedna z nich byla konstantní. Na obrázcích 61 a 62 byly porovnány PLA, PU a PBS/PU nanostruktury při stejných hodnotách FE v MPPS, tedy téměř stejných filtračních účinnostech. Zatímco při nižších filtračních účinnostech (96,2 %) se hodnoty tlakových ztrát pro PLA ($\Delta p = 64,2$ Pa) a PBS/PU ($\Delta p = 67,6$ Pa) téměř shodují (obrázek 61), při vyšších filtračních účinnostech (cca 99,7 %, obrázek 62) jsou tlakové ztráty pro PBS/PU ($\Delta p = 119,2$ a $125,9$ Pa), tedy větší než u PLA ($\Delta p = 99,5$ Pa) v důsledku přítomnosti objemných defektů v nanostruktuře PBS/PU (SPP ~ 400 nm). Tento postup porovnávání vlastností ale není dostatečně objektivní, protože pro přesné posouzení je nezbytné vzít v úvahu i velikosti průměru vláken u jednotlivých nanostruktur. Z histogramů jednotlivých nanostruktur je zřejmé, že PBS/PU nanostruktury obsahují velmi jemná vlákna.

Tlaková ztráta PU 186 nanostruktury ($\Delta p = 136,8$ Pa) je větší než u PLA (jen $\Delta p = 99,5$ Pa) se stejnou křivkou závislosti filtrační účinnosti na velikosti filtrovaných částic. PU nanostruktura je uzavřenější (SPP = 770) ve srovnání s otevřenější PLA strukturou (SPP = 1 020 nm).

6.3 Morfologie nanostruktur

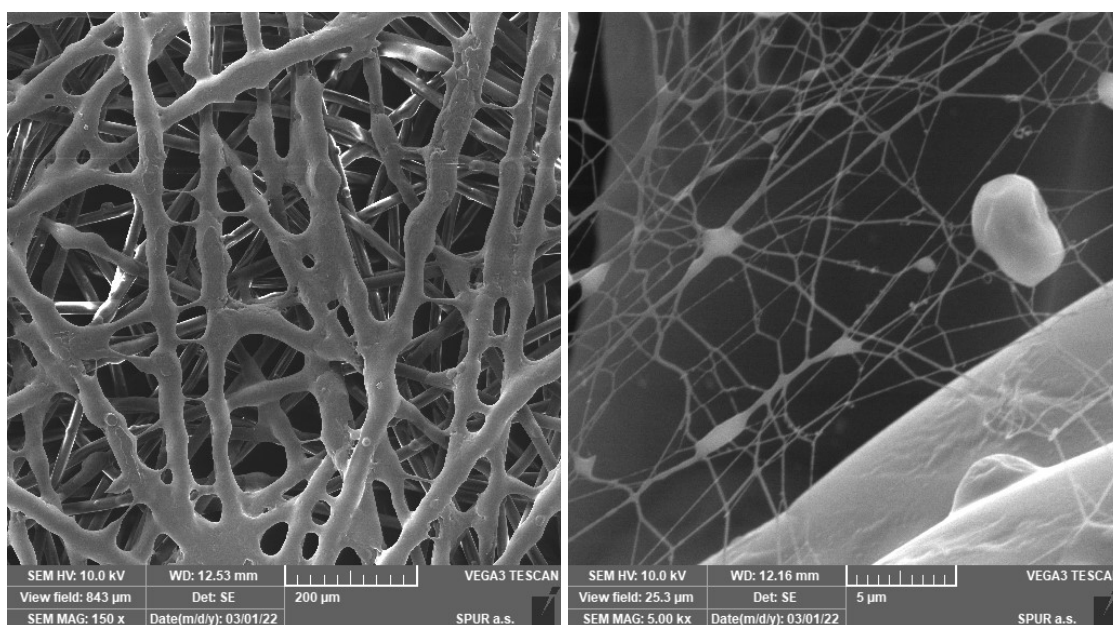
Přítomnost objemných částic a beads v nanostrukturách mají za následek snížení středního průměru pórů (obrázek 63) a v důsledku toho zvyšování tlakové ztráty nanostruktury. Menší průměr nanovláken a vyšší hodnoty velikosti pórů pozitivně ovlivňují filtrační vlastnosti.



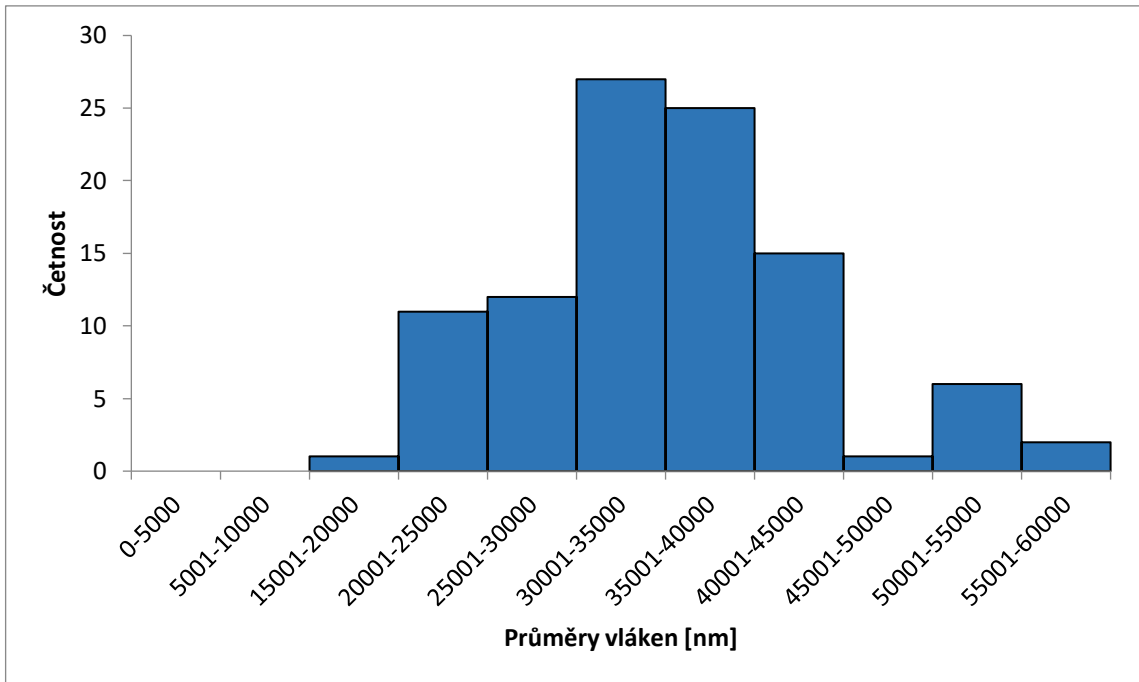
Obrázek 63: Závislost průměru vláken na střední velikosti pórů pro vzorky PU, PLA a PBS/PU

6.4 PLA struktury s nízkou tlakovou ztrátou

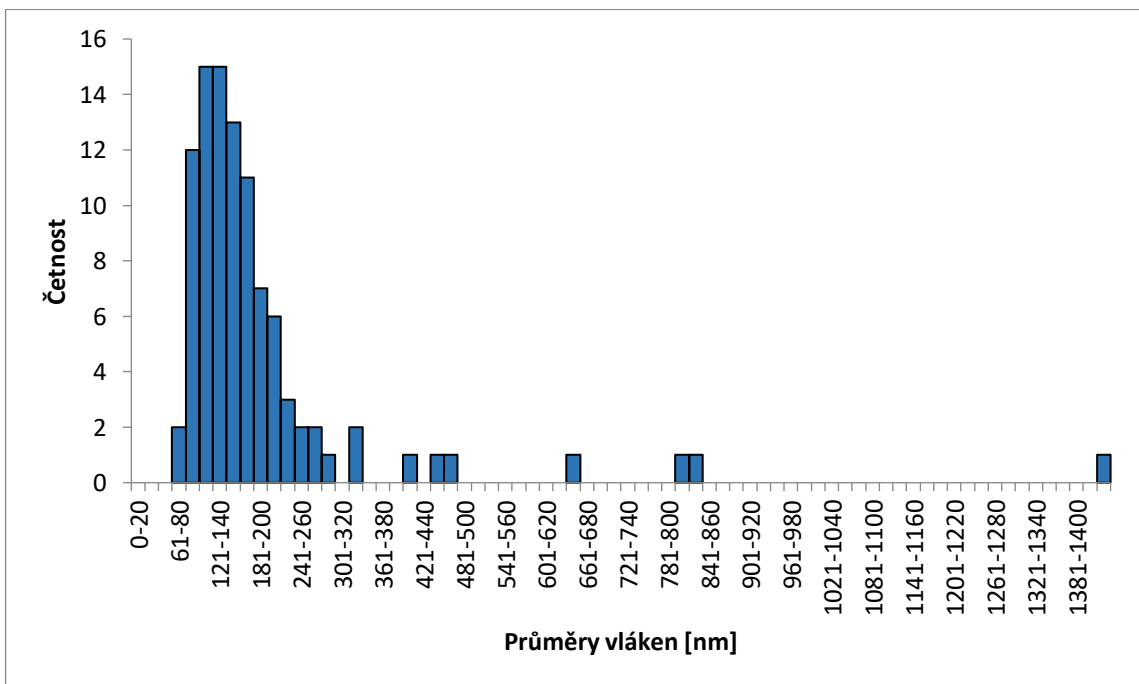
Protože nejzajímavější filtrační materiály jsou ty s nízkou tlakovou ztrátou a vysokou FE, zaujaly nás struktury (obrázek 64) připravené elektrosprayingem PLA na PP SB 30 (PLA spray) a obsahující větvené polymerní sítě (PLA síť) s přibližně 30 % obsahem nanovláken s průměrem menším než 100 nm (obrázek 66). Při zpracování PLA roztoku s nízkou elektrickou vodivostí docházelo při dávkování roztoku od 1,37 do 2,06 ml·min⁻¹ pouze ke sprayování roztoku a usazování PLA na PP substrát. Při dávkování 2,4 ml·min⁻¹ se začala z PLA roztoku nanoseného na PP mikroválkna vytvářet větvená polymerní síť s velmi jemnými vlákny. Tato struktura ale zároveň obsahovala mnoho děr v důsledku čehož měla nízkou tlakovou ztrátu.



Obrázek 64: Snímek vzorku PLA spray při zvětšení 150x (vlevo) a snímek vzorku PLA síť při zvětšení 5000x (vpravo) pořízené na SEM



Obrázek 65: Histogram průměrů vláken pro PLA spray



Obrázek 66: Histogram průměrů vláken pro PLA síť

Tabulka 10: Charakterizace PLA spray a PLA síť

Označení nanostruktury	PLA spray	PLA síť
Střední hodnota průměru vláken [nm]	30 295	3 147
Střední průměrná velikost pórů [nm]	10 785	1 588
Nejčtetnější interval průměrů nanovláken [nm]	30 001 - 35 000	101 - 120
Plošná hmotnost nanostruktury [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$]	5,62	3,57
Rychlost dávkování roztoku [$\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$]	1,37 - 2,06	2,40
FE v MPPS [%]	41,99	6,67
Tlaková ztráta [Pa]	2,98	3,75
Faktor kvality [kPa^{-1}]	182,74	18,41

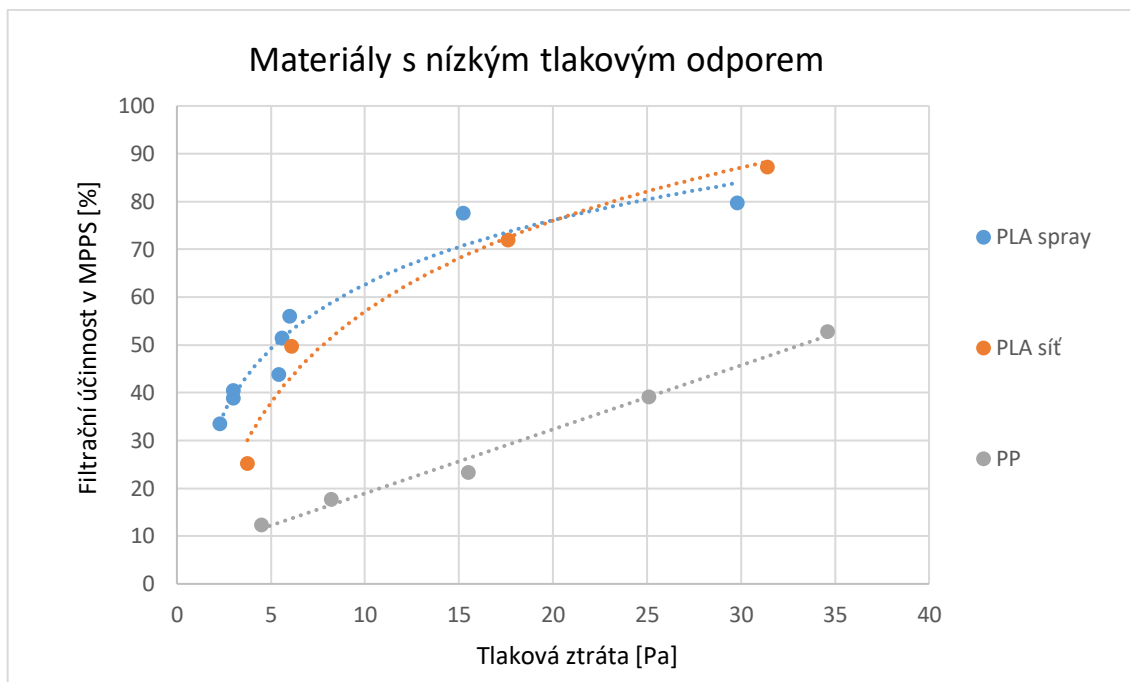
Změnou rychlosti dávkování roztoku a vrstvením struktur byly připraveny materiály s filtračními vlastnostmi shrnutými do tabulek 11 a 12.

Tabulka 11: Charakterizace PLA spray

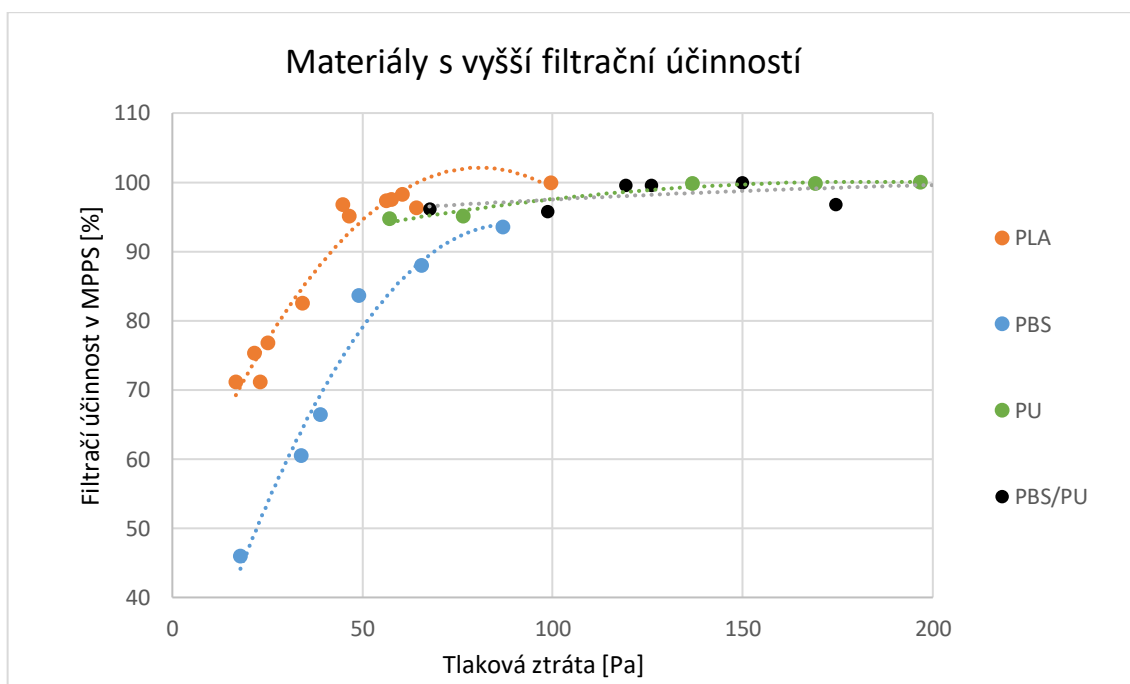
Označení struktury	PLA spray							
FE v MPPS [%]	33,6	40,5	38,9	43,8	51,5	56,0	77,6	79,7
Tlaková ztráta [Pa]	2,3	3,0	3,0	5,4	5,6	6,0	15,2	29,8
Faktor kvality [kPa^{-1}]	178,03	173,06	164,22	106,71	129,21	136,83	98,43	53,51

Tabulka 12: Charakterizace PLA síť

Označení nanostruktury	PLA síť			
FE v MPPS [%]	25,2	49,8	72,0	87,2
Tlaková ztráta [Pa]	3,8	6,1	17,6	31,4
Faktor kvality [kPa^{-1}]	76,41	112,98	72,33	65,47



Obrázek 67: Závislost filtrační účinnosti v MPPS na tlakové ztrátě pro vzorky PLA spray, PLA síť a PP



Obrázek 68: Závislost filtrační účinnosti v MPPS na tlakové ztrátě pro vzorky PLA, PBS, PU a PBS/PU

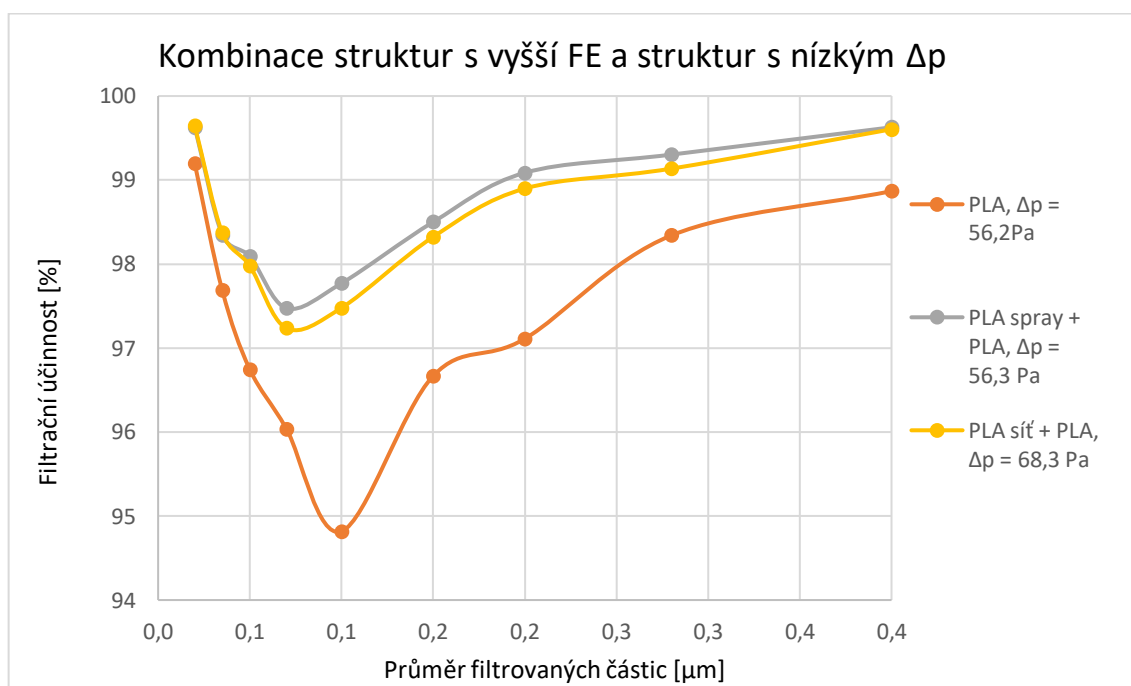
Na obrázcích 67 a 68 jsou shrnuty filtrační účinnosti v bodě MPPS pro sledované materiály s nízkým tlakovým odporem a vysokými hodnotami filtrační účinnosti. Filtrační účinnosti PLA spray a PLA síť struktur jsou při srovnatelných tlakových ztrátách výrazně vyšší než u samotného PP spun bondového substrátu. Filtrační účinnost PP 30 jeho postupným

vrstvením lineárně roste. Jak u sprayovaných struktur, tak i u struktur s nanosítěmi s rostoucí tlakovou ztrátou mají vysoké hodnoty faktoru kvality klesající tendenci.

Z nanostukturovaných materiálů (PLA, PU, PBS/PU) měly nejlepší filtrační účinnost při srovnatelných tlakových ztrátách nanostruktury z PLA (obrázek 68). Aplikací nanovláken ve filtračních materiálech lze docílit účinnosti záchytu blízké se 100 % již při tlakových ztrátách nad 100 Pa.

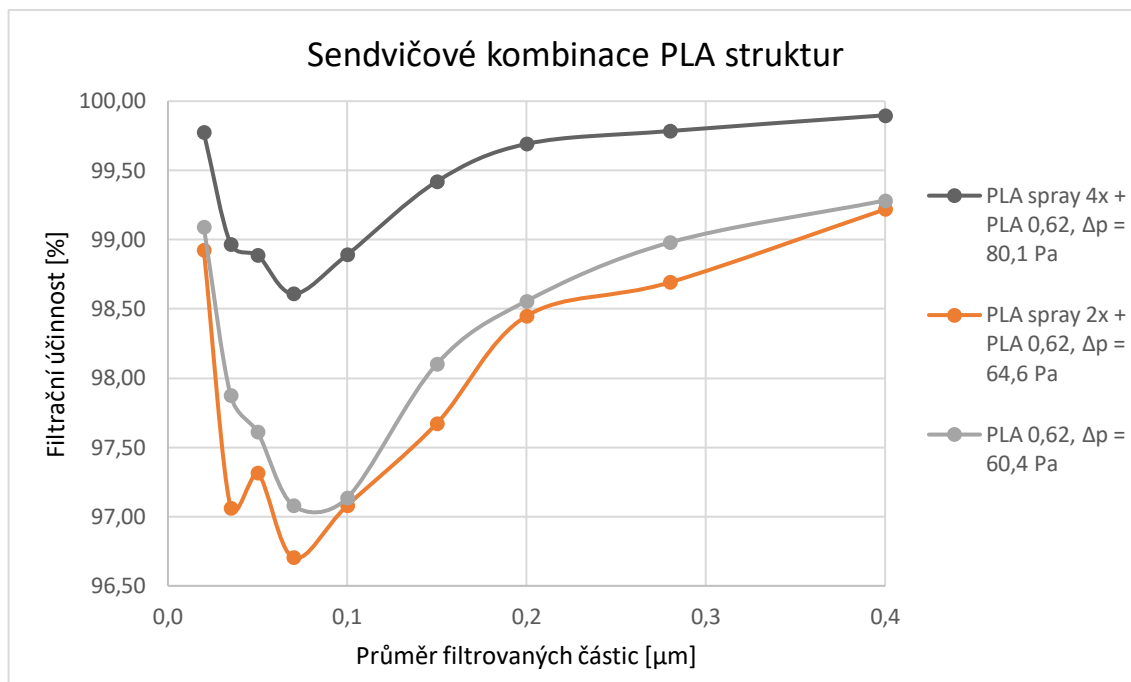
6.4.1 Kombinace PLA nanostruktur

PLA nanostruktury z obrázku 64 vykazují velice nízké tlakové ztráty a je nasnadě je zkombinovat s nanovláknitou strukturou s velkou filtrační účinností. Vlastnosti nanostruktury použité pro kombinace připravené pouhým položením struktur na sebe, jsou uvedeny na obrázku 69. Struktury PLA síť s $\Delta p = 3,8$ Pa a PLA spray s $\Delta p = 3,0$ Pa byly kombinovány s PLA s $\Delta p = 56,2$ Pa.



Obrázek 69: Závislost filtrační účinnosti pro PLA nanostrukturu v kombinaci s PLA spray a PLA síť

Byla zkoušena i kombinace se zvýšeným obsahem materiálu s nízkou tlakovou ztrátou (2 a 4 vrstvy) vytvořením sendvičových struktur s PLA o $\text{PH} = 0,62 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ a $\Delta p = 60,4$ Pa (obrázek 70). U struktur se 4 vrstvami PLA spray materiálu došlo k žádoucímu zvýšení FE ale i současném zvýšení tlakového odporu o 25 %.



Obrázek 70: Závislost filtrační účinnosti na průměru filtrovaných částic pro sendvičové kombinace PLA struktur

6.5 Nejlepší připravené materiály

Tabulka 13: Srovnání nejlepší materiálů

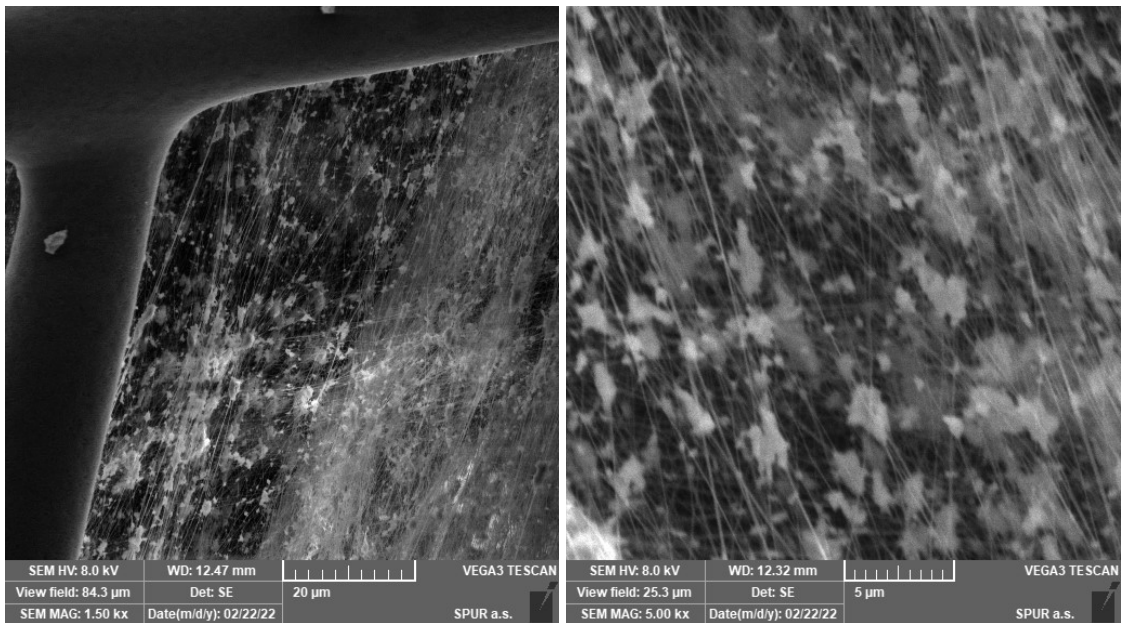
Označení nanostruktur	Faktor kvality [kPa ⁻¹]	Filtrační účinnost v MPPS [%]	Tlakový odpor [Pa]
PU QAS 166	51,7	94,74	57,0
PLA 220	58,5	97,08	60,4
PBS/PU 153 2x	54,2	99,97	149,8
PLA spray 4x + PLA 220	53,4	98,61	80,1

V tabulce 13 jsou uvedeny nejlepší připravené materiály. Všechny výše uvedené materiály mají vysoké faktory kvality, dobrou filtrační účinnost v MPPS a nízký tlakový odpor.

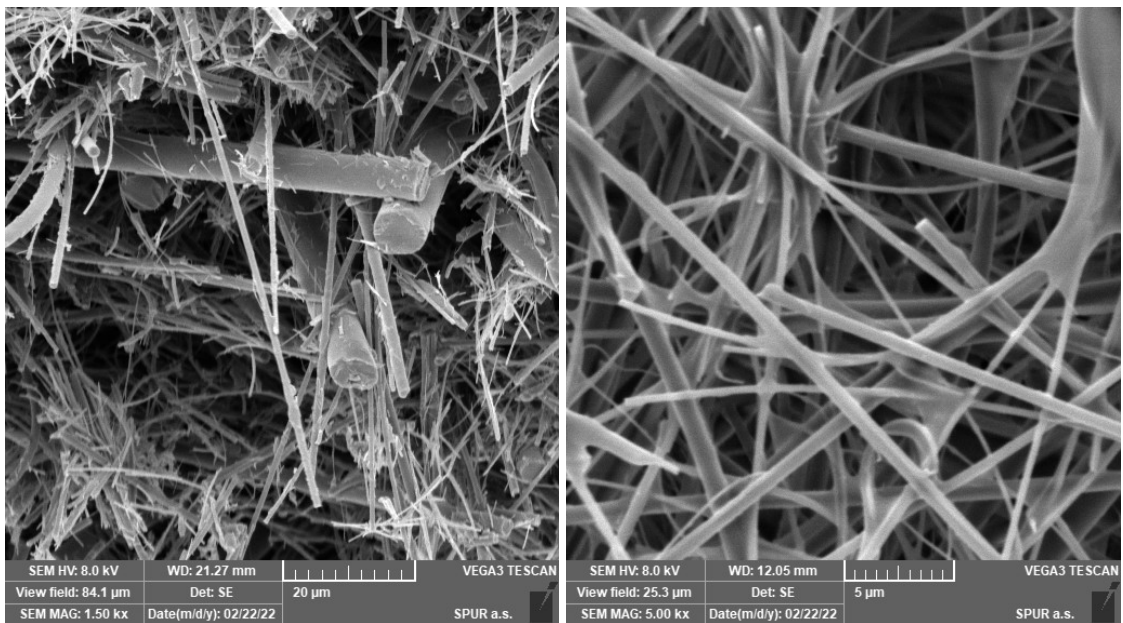
6.6 Srovnání filtračních vlastností připravených nanostruktur s komerčními materiály

Na následujících SEM snímcích jsou nanostrukтуры z extrudovaného PTFE Nitto, Japan (obrázek 71) a borosilikátových, již od pohledu velmi křehkých vláken Holingsworth and Vose (HW+V), Massachusetts, USA (obrázek 72), které se používají pro výrobu skládaných filtrů do klimatizací a pro filtry masek. Tyto materiály srovnáváme ve třech úrovních FE >

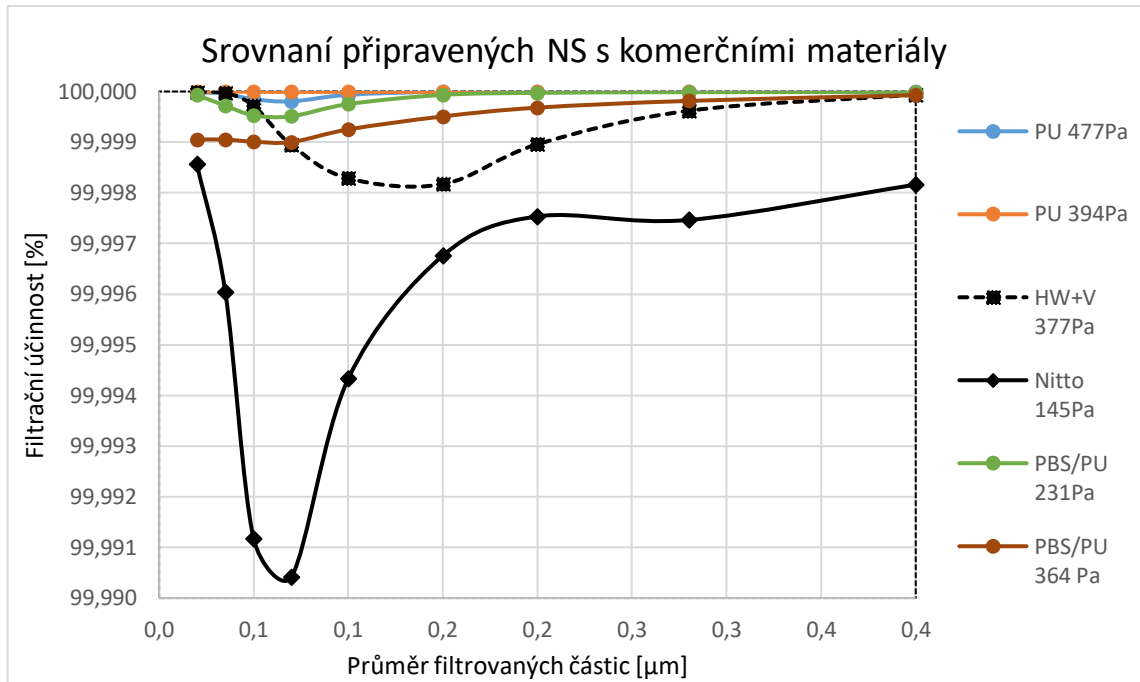
99,99 % (obrázek 73), FE > 99,97 % (obrázek 74) a FE > 99,80 % (obrázek 75) s námi připravenými polymerními nanostrukturami.



Obrázek 71: ePTFE Nitto, Japan

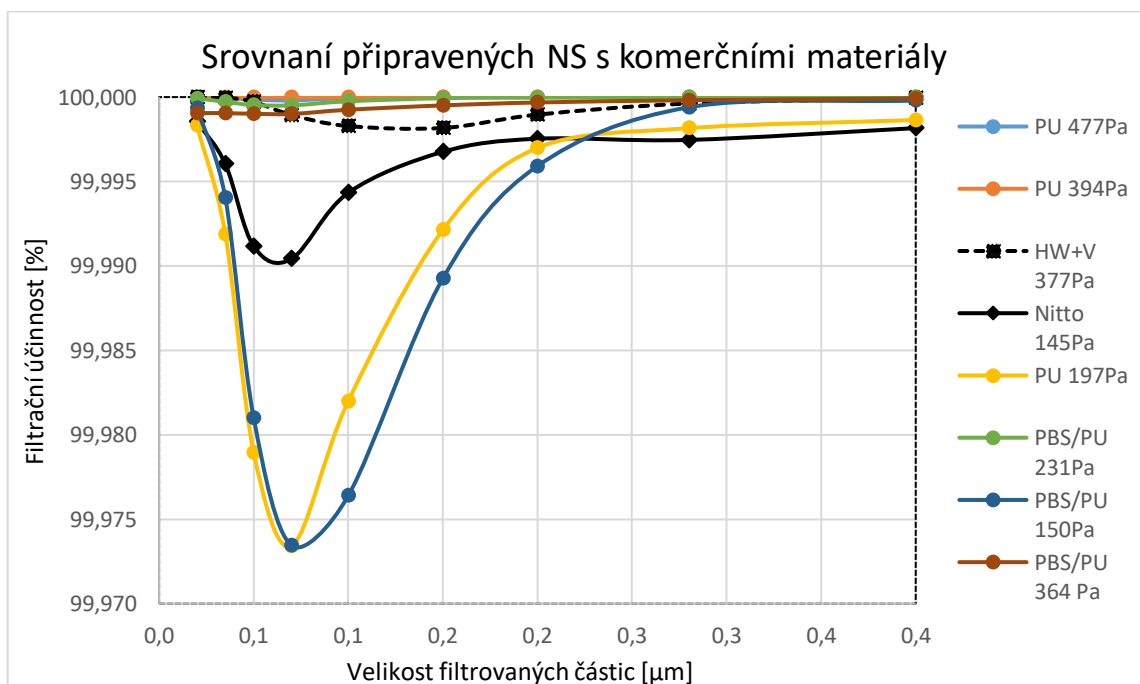


Obrázek 72: Holingsworth and Vose, Massachusetts, USA



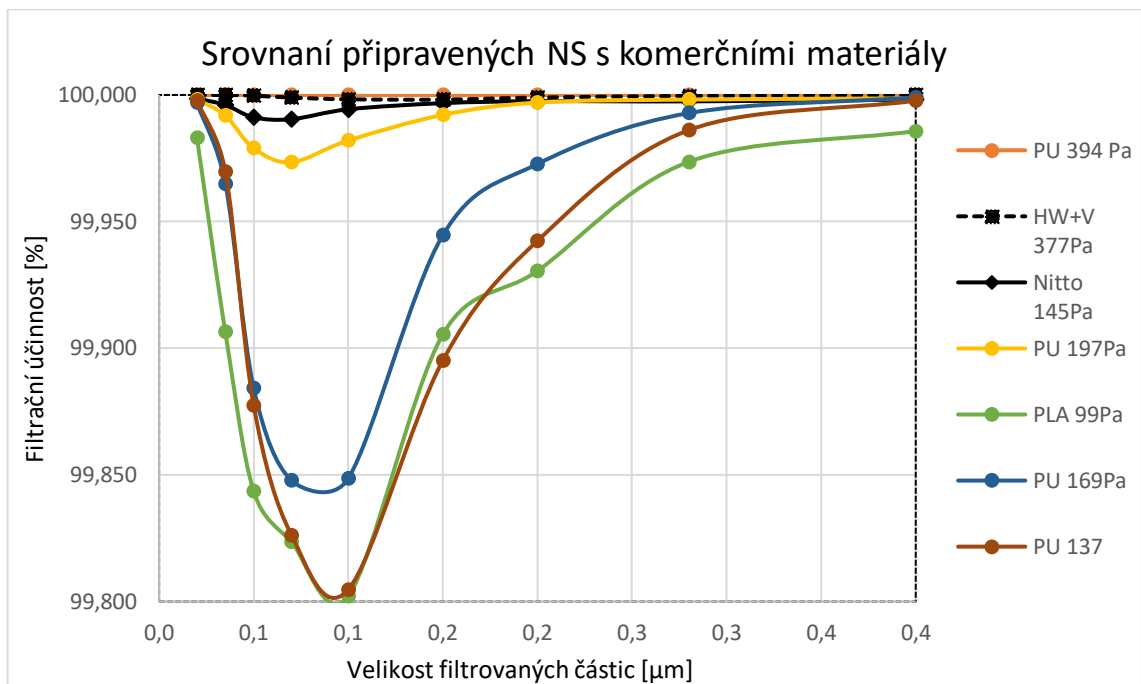
Obrázek 73: Srovnání filtračních účinností pro FE >99,99 %

Ve srovnání s japonským a americkým materiálem velmi dobře dopadla námi připravená nanostruktura PBS/PU s $\Delta p = 231$ Pa, která předčila zahraniční materiály svou FE a svou tlakovou ztrátou byla lepší než materiál HW+V. Stanovenému kritériu na FE vyhověly i PU nanostruktury s obsahem beads (PU 281 A PU 196) především díky svým vysokým filtračním účinnostem ale na úkor vyšších tlakových ztrát.



Obrázek 74: Srovnání filtračních účinností pro FE >99,97 %

K materiálům s požadavky na $FE > 99,97\%$ lze přiřadit i PU s $\Delta p = 197\text{ Pa}$ a PBS/PU s $\Delta p = 150\text{ Pa}$



Obrázek 75: Srovnání filtračních účinností pro $FE > 99,80\%$

Požadavek na $FE > 99,80\%$ splňuje již celá řada materiálů testovaných v této studii jako např. PU s $\Delta p = 137\text{ Pa}$, PU s $\Delta p = 169\text{ Pa}$, a především PLA s $\Delta p = 99\text{ Pa}$. Lze předpokládat, že v případě další optimalizace by polymerní nanostruktury mohly svými vlastnostmi předčit skleněné a fluorované filtrační materiály ve smyslu dosažení stejných filtračních účinností při nižších tlakových ztrátách.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo připravit a analyzovat různé nanostruktury pro filtraci vzduchu. Bylo prokázáno, že filtrační účinnost nanostruktur se zvyšuje aplikací nanovláken s co nejmenším průměrem. Nanostruktury s prostorovým uspořádáním s co největší hodnotou středního průměru pórů, zlepšují (snižují) tlakovou ztrátu. Přítomnost objemových defektů a beads v nanostrukturách má za následek zvyšování filtrační účinnosti, ale i zvyšování tlakové ztráty nanostruktur. Přítomnost globulárních defektů ale může být příčinou vzniku nanostruktur s větším podílem tenkých nanovláken, s průměrem menším než 100 nm, což vede ke zvýšení filtrační účinnosti, jak bylo potvrzeno u PBS/PU nanostruktur. Je zřejmé, že optimální struktura bude vyžadovat kompromis mezi zastoupením výše prezentovaných proměnných.

Připravené filtrační materiály s $\Delta p < 100$ Pa, lze s výhodou použít v osobních ochranných prostředcích (rouškách a respirátorech) dle EN 149. Diskutované nanostruktury s vysokou filtrační účinností lze s výhodou použít ve skládaných filtrech do filtrů pro obličejové masky a klimatizací klasifikovaných dle EN 1822.

Ze zjištěných skutečností můžeme konstatovat, že ideální struktura pro záchyt submikronových částic by mohla být tvořena tlustšími vlákny (s průměrem kolem 500 nm), které budou mít zároveň ztužující efekt a zajistí co nejvyšší hodnoty středního průměru pórů, a tenkými nanovláknými s co největším obsahem nanovláken menším než 100 nm. Je ale žádoucí, aby se při vzniku tenkých nanovláken netvořily objemové defekty. Přiblížit se takové struktuře by bylo možné např. opakovanou kombinací silnějších (PBS) a co nejtenších nanovláken (PU, PLA). Vláknotvorný proces, kdybychom takovou strukturu připravili v jednom kroku, elektrospinningem z jednoho roztoku (ze směsi polymerů) se nám bohužel nepodařilo zvládnout.

Nejlepší připravené nanostruktury s vysokými filtračními účinnostmi a faktory kvality jsou sumarizovány v kapitole 6.5 (tabulka 13). Srovnáním s komerčními materiály pro skládané filtry bylo zjištěno, že nanostruktury z polymerních vláken lze s výhodou aplikovat pro filtry do masek a klimatizací.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Yankang Deng, Tao Lu, Jiaxin Cui, Wenjing Ma, Qingli Qu, Xiaoli Zhang, Yingying Zhang, Miaomiao Zhu, Ranhua Xiong, Chaobo Huang, Morphology engineering processed nanofibrous membranes with secondary structure for high-performance air filtration, *Separation and Purification Technology* 2022, 294, 121093, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121093>
- [2] Ahmed Barhoum, Kaushik Pal, Hubert Rahier, Hasan Uludag, Ick Soo Kim, Mikhael Bechelany, Nanofibers as new-generation materials: From spinning and nano-spinning fabrication techniques to emerging applications, *Applied Materials Today* 2019, 17, 1-35, <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.06.015>
- [3] Tao Lu, Jiaxin Cui, Qingli Qu, Yulin Wang, Jian Zhang, Ranhua Xiong, Wenjing Ma, Chaobo Huang, Multistructured Electrospun Nanofibers for Air Filtration: A Review, *ACS Applied Materials and Interfaces* 2021, 13, 23293-23313, <https://doi.org/10.1021/acsami.1c06520>
- [4] Tingting Wu, Mengzhen Ding, Cuiping Shi, Yiqun Qiao, Panpan Wang, Ruirui Qiao, Xichang Wang, Jian Zhong, Resorbable polymer electrospun nanofibers: History, shapes and application for tissue engineering, *Chinese Chemical Letters* 2020, 31, 617-625, <https://doi.org/10.1016/j.ccllet.2019.07.033>
- [5] Tucker Nick, Stanger J. Johnathan, Staiger P. Mark, Razzaq Hussam, Hofman Kathleen, The history of the science and technology of electrospinning from 1600 to 1995, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* 2012, 7, 63-73, <https://doi.org/10.1177/155892501200702s10>
- [6] Jiaxin Cui, Tao Lu, Fanghua Li, Yulin Wang, Jiandu Lei, Wenjing Ma, Yan Zou, Chaobo Huang, Flexible and transparent composite nanofibre membrane that was fabricated via a “green” electrospinning method for efficient particulate matter 2.5 capture, *Journal of Colloid and Interface Science* 2021, 582, 506-514, <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.08.075>
- [7] Weichang Li, Qianqian Yu, Hang Yao, Yue Zhu, Paul D. Topham, Kan Yue, Li Ren, Linge Wang, Superhydrophobic hierarchical fiber/bead composite membranes for efficient treatment of burns, *Acta Biomaterialia* 2019, 92, 60-70, <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2019.05.025>

- [8] Zihang Peng, Ye Yang, Jiyue Luo, Chuanxiong Nie, Lang Ma, Chong Cheng, Changsheng Zhao, Nanofibrous polymeric beads from aramid fibers for efficient bilirubin removal, *Biomaterials Science* 2016, 4, 1392-1401, <https://doi.org/10.1039/c6bm00328a>
- [9] Ning Han, Wei Zhang, Wei Guo, Sijie Xie, Chi Zhang, Xuan Zhang, Jan Fransaer, Shaomin Liu, Novel oxygen permeable hollow fiber perovskite membrane with surface wrinkles, *Separation and Purification Technology* 2021, 261, 118295 <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.118295>
- [10] Jie Zeng, Xixi Ji, Yihui Ma, Zhongxing Zhang, Shuguang Wang, Zhonghua Ren, Chunyi Zhi, Jie Yu, 3D Graphene Fibers Grown by Thermal Chemical Vapor Deposition, *Advanced Materials* 2018, 30, 1705380, <https://doi.org/10.1002/adma.201705380>
- [11] Adam Joseph-Podufaly Bauer, Zachary Buchanan Grim, Bingbing Li, Hierarchical Polymer Blend Fibers of High Structural Regularity Prepared by Facile Solvent Vapor Annealing Treatment, *Macromolecular Materials and Engineering* 2018, 303, 1700489, <https://doi.org/10.1002/mame.201700489>
- [12] Jun Song, Bowen Zhang, Zihan Lu, Zhiying Xin, Ting Liu, Wenyuan Wei, Qasim Zia, Kewen Pan, R. Hugh Gong, Liming Bian, Yi Li, Jiashen Li, Hierarchical Porous Poly(l-lactic acid) Nanofibrous Membrane for Ultrafine Particulate Aerosol Filtration, *ACS Applied Materials and Interfaces* 2019, 11, 46261-46268, <https://doi.org/10.1021/acsami.9b18083>
- [13] Jiajia Xue, Jingwei Xie, Wenyong Liu, Younan Xia, Electrospun Nanofibers: New Concepts, Materials, and Applications, *Accounts of Chemical Research* 2017, 50, 1976-1987, <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.7b00218>
- [14] Xiu Dai, Xu Li, Xinlong Wang, Morphology controlled porous poly(lactic acid)/zeolitic imidazolate framework-8 fibrous membranes with superior PM2.5 capture capacity, *Chemical Engineering Journal* 2018, 338, 82-91, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.025>
- [15] Jinxin Liu, Xing Zhang, Haifeng Zhang, Lei Zheng, Chen Huang, Haibo Wu, Rongwu Wang, Xiangyu Jin, Low resistance bicomponent spunbond materials for fresh air filtration with ultra-high dust holding capacity, *RSC Advances* 2017, 7, 43879-43887, <https://doi.org/10.1039/C7RA07694K>
- [16] Zijian Dai, Jiafei Su, Xiaoming Zhu, Kangli Xu, Jie Zhu, Chen Huang, Qinfei Ke, Multifunctional polyethylene (PE)/polypropylene (PP) bicomponent fiber filter with

anchored nanocrystalline MnO₂ for effective air purification, *Journal of Materials Chemistry A* 2018, 6, 14856-14866, <https://doi.org/10.1039/C8TA03683G>

[17] Jianming Rui, Jing Li, Yajing Li, Hongli Liu, Yinhao Zhang, Jie Huang, Peilin Ma, Zhong Chen, Preparation of C–SiC/ZrSixOyCz core-shell fibers by Coaxial electrospinning and the high-temperature performance, *Ceramics International* 2022, 48, 2625-2631, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.10.045>

[18] Jihyun Yoon, Ho-Sung Yang, Byoung-Sun Lee, Woong-Ryeol Yu, Recent Progress in Coaxial Electrospinning: New Parameters, Various Structures, and Wide Applications, *Advanced Materials* 2018, 30, 1704765, <https://doi.org/10.1002/adma.201704765>

[19] Gaigai Duan, Andreas Greiner, Air-Blowing-Assisted Coaxial Electrospinning toward High Productivity of Core/Sheath and Hollow Fibers, *Macromolecular Materials and Engineering* 2019, 304, 1800669, <https://doi.org/10.1002/mame.201800669>

[20] Baiwang Zhao, Gui Min Shi, Juin-Yih Lai, Tai-Shung Chung, Braid-reinforced polybenzimidazole (PBI) hollow fiber membranes for organic solvent nanofiltration (OSN), *Separation and Purification Technology* 2022, 290, 120811, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120811>

[21] Xin Fan, Yu Wang, Min Zheng, Francis Dunne, Tian Liu, Xuewei Fu, Lushi Kong, Siyi Pan, Wei-Hong Zhong, Morphology engineering of protein fabrics for advanced and sustainable filtration, *Journal of Materials Chemistry A* 2018, 6, 21585-21595, <https://doi.org/10.1039/C8TA08717B>

[22] Chunya Wang, Shuyi Wu, Muqiang Jian, Jiarong Xie, Luping Xu, Xudong Yang, Quanshui Zheng, Yingying Zhang, Silk nanofibers as high efficient and lightweight air filter, *Nano Research* 2016, 9, 2590-2597, <https://doi.org/10.1007/s12274-016-1145-3>

[23] Jinwei Xu, Chong Liu, Po-Chun Hsu, Kai Liu, Rufan Zhang, Yayuan Liu, Yi Cui, Roll-to-Roll Transfer of Electrospun Nanofiber Film for High-Efficiency Transparent Air Filter, *Nano Letters* 2016, 16, 1270-1275, <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b04596>

[24] Dalia Buivydiene, Edvinas Krugly, Darius Ciuzas, Martynas Tichonovas, Linas Kliucininkas, Dainius Martuzevicius, Formation and characterisation of air filter material printed by melt electrospinning, *Journal of Aerosol Science* 2019, 48-63, <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2019.03.003>

- [25] Kai Zhang, Zongjie Li, Nanping Deng, Jingge Ju, Yafang Li, Bowen Cheng, Weimin Kang, Jing Yan, Tree-like cellulose nanofiber membranes modified by citric acid for heavy metal ion (Cu^{2+}) removal, *Cellulose* 2019, 26, 945-958, <https://doi.org/10.1007/s10570-018-2138-z>
- [26] Zongjie Li, Yong Liu, Jing Yan, Kangxin Wang, Baolei Xie, Yunxia Hu, Weimin Kang, Bowen Cheng, Electrospun polyvinylidene fluoride/fluorinated acrylate copolymer tree-like nanofiber membrane with high flux and salt rejection ratio for direct contact membrane distillation, *Desalination* 2019, 466, 68-76, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.05.005>
- [27] Zongjie Li, Yongzheng Xu, Lanlan Fan, Weimin Kang, Bowen Cheng, Fabrication of polyvinylidene fluoride tree-like nanofiber via one-step electrospinning, *Materials and Design* 2016, 92, 95-101, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.037>
- [28] Shichao Zhang, Hui Liu, Ning Tang, Sheng Zhou, Jianyong Yu, Bin Ding, Spider-Web-Inspired $\text{PM}_{0.3}$ Filters Based on Self-Sustained Electrostatic Nanostructured Networks, *Advanced Materials* 2020, 32, 2002361, <https://doi.org/10.1002/adma.202002361>
- [29] Dušan Kimmer, Petr Slobodian, David Petráš, Martin Zatloukal, Robert Olejník, Petr Sába, Polyurethane/multiwalled carbon nanotube nanowebs prepared by an electrospinning process, *Journal of Applied Polymer Science* 2009, 111, 2711-2714, <https://doi.org/10.1002/app.29238>
- [30] Mansab Ali Saleemi, Vuanghao Lim, Overview of antimicrobial polyurethane-based nanocomposite materials and associated signalling pathways, *European Polymer Journal* 2022, 167, 111087, <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2022.111087>
- [31] Hengameh Honarkar, Waterborne polyurethanes: A review, *Journal of Dispersion Science and Technology* 2018, 39, 507-516, <https://doi.org/10.1080/01932691.2017.1327818>
- [32] Zhang Yachuan, Processing and Development of Polysaccharide-Based Biopolymers for Packaging Applications [online], Elsevier, 2020, 1, ISBN 978-0-12-818796-8, <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPDPBBPA1/processing-development/processing-development>
- [33] Tiago Lima de Albuquerque, José Edvan Marques Júnior, Lívia Pinheiro de Queiroz, Anderson Diógenes Souza Ricardo, Maria Valderez Ponte Rocha, Polylactic acid production

from biotechnological routes: A review, *International Journal of Biological Macromolecules* 2021, 186, 933-951, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.074>

[34] Oskars Platnieks, Sergejs Gaidukovs, Vijay Kumar Thakur, Anda Barkane, Sergejs Beluns, Bio-based poly (butylene succinate): Recent progress, challenges and future opportunities, *European Polymer Journal* 2021, 161, 110855, <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110855>

[35] Nikoleta Stoyanova, Dilyana Paneva, Rosica Mincheva, Antoniya Toncheva, Nevena Manolova, Philippe Dubois, Iliya Rashkov, Poly(l-lactide) and poly(butylene succinate) immiscible blends: From electrospinning to biologically active materials, *Materials Science and Engineering: C* 2014, 41, 119-126, <https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.04.043>

[36] Samerender Nagam Hanumantharao, Smitha Rao, Multi-Functional Electrospun Nanofibers from Polymer Blends for Scaffold Tissue Engineering, *Fibers* 2019, 7, 66, <https://doi.org/10.3390/fib7070066>

[37] Martin Zatloukal, *Novel Trends in Rheology III*, United States of America: American Institute of Physics, 2009, 1152, 305-306, ISBN 978-0-7354-0689-6

[38] Shamim Zargham, Saeed Bazgir, Amir Tavakoli, Abo Saied Rashidi, Rogheih Damerchely, The Effect of Flow Rate on Morphology and Deposition Area of Electrospun Nylon 6 Nanofiber, *Journal of Engineered Fibers and Fabric* 2012, 7, 42-49, <https://doi.org/10.1177/155892501200700414>

[39] Goki Eda, James Liu, Satya Shivkumar, Solvent effects on jet evolution during electrospinning of semi-dilute polystyrene solutions, *European Polymer Journal* 2007, 43, 1154-1167, <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2007.01.003>

[40] Josefa Guerrero, Javier Rivero, Venkata R. Gundabala, Miguel Perez-Saborid, Alberto Fernandez-Nieves, Whipping of electrified liquid jets, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2014, 111, 13763-13767, <https://doi.org/10.1073/pnas.1411698111>

[41] Luong T. H. Nguyen, Chen, Naveen K. Elumalai, Molamma P. Prabhakaran, Yun Zong, Chellappan Vijila, Suleyman I. Allakhverdiev, Seeram Ramakrishna, Biological, Chemical, and Electronic Applications of Nanofibers, *Macromolecular Materials and Engineering* 2013, 298, 822-867, <https://doi.org/10.1002/mame.201200143>

[42] Gaharwar, A.K., Sant, S., Hancock, M.J., Hacking, S.A., *Nanomaterials in Tissue Engineering - Fabrication and Applications* [online], Woodhead Publishing 2013, 1, 978-0-

85-709723-1, <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpNTEFA00A/nanomaterials-in-tissue/nanomaterials-in-tissue>

[43] Chang Liu, Yongtao Tan, Ying Liu, Kuiwen Shen, Bowu Peng, Xiaoqin Niu, Fen Ran, Microporous carbon nanofibers prepared by combining electrospinning and phase separation methods for supercapacitor, *Journal of Energy Chemistry* 2016, 25, 587-593, <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2016.03.017>

[44] Fei Fei Fang, Yu-Zhen Dong, Hyoung Jin Choi, Effect of oxidants on morphology of interfacial polymerized polyaniline nanofibers and their electrorheological response, *Polymer* 2018, 158, 176-182, <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.10.065>

[45] Dan Li, Jiaying Huang, Richard B. Kaner, Polyaniline Nanofibers: A Unique Polymer Nanostructure for Versatile Applications, *Accounts of Chemical Research* 2009, 42, 135-145, <https://doi.org/10.1021/ar800080n>

[46] Alberto Vomiero, Matteo Ferroni, Elisabetta Comini, Guido Faglia, Giorgio Sberveglieri, Insight into the Formation Mechanism of One-Dimensional Indium Oxide Wires, *Crystal Growth and Design* 2010, 10, 140-145, <https://doi.org/10.1021/cg900749j>

[47] Lan Yang, Liqun Zhou, Ying Huang, Ziwei Tang, Hydrothermal synthesis of GdBO₃:Eu³⁺ nanofibres, *Materials Letters* 2010, 64, 2704-2706, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2010.08.062>

[48] Hinds, William C, *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, 2nd edition, New York: John Wiley, 2012, ISBN 978-0-471-19410-1

[49] Abhiteja Konda, Abhinav Prakash, Gregory A. Moss, Michael Schmoldt, Gregory D. Grant, Supratik Guha, Aerosol Filtration Efficiency of Common Fabrics Used in Respiratory Cloth Masks, *ACS Nano* 2020, 14, 6339-6347, <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c03252>

[50] A.C.C. Bortolassi, V.G. Guerra, M.L. Aguiar, Characterization and evaluate the efficiency of different filter media in removing nanoparticles, *Separation and Purification Technology* 2017, 175, 79-86, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.11.010>

[51] Tongling Xia, Ye Bian, Li Zhang, Chun Chen, Relationship between pressure drop and face velocity for electrospun nanofiber filters, *Energy and Buildings* 2018, 158, 987-999, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.073>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PU	Polyurethan
PLA	Kyselina polyléčná
PBS	Polybutylen sukcinát
PP	Polypropylen
q_F	Faktor kvality
P	Propustnost částic
Δp	Tlaková ztráta
FE	Filtrační účinnost
SPP	Střední průměr pórů
MPPS	Nejpronikavější velikost částic

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Různé morfologie nanovláken [3].....	14
Obrázek 2: Tvorba koráلكové struktury [3].....	16
Obrázek 3: Vrásčité struktura [11].....	17
Obrázek 4: Porézní struktura [14].....	18
Obrázek 5: Jád-ro-slupka struktura [17].....	19
Obrázek 6: Dutá struktura [20].....	20
Obrázek 7: Pásková struktura [24].....	21
Obrázek 8: Rozvětvená struktura v porovnání se stromem [27].....	22
Obrázek 9: Síťová struktura [29].....	23
Obrázek 10: Zařízení na výrobu nanovláken pomocí elektrostatického zvlákňování [29] .	25
Obrázek 11: Zachycení [48].....	34
Obrázek 12: Impakce [48].....	35
Obrázek 13: Difuze [48].....	35
Obrázek 14: Celková filtrační účinnost [48].....	36
Obrázek 15: Zařízení SpinLine 40.....	40
Obrázek 16: Konduktometr a elektroda.....	42
Obrázek 17: Viskozimetr s čidlem.....	43
Obrázek 18: Průtokový porometr.....	44
Obrázek 19: Příklad na měření filtračních vlastností.....	44
Obrázek 20: Závislost filtrační účinnosti na průměru filtrovaných částic pro PP 30.....	48
Obrázek 21: Snímky vzorku PU 281 pořízené na SEM při zvětšení 1500x a 5000x.....	50
Obrázek 22: Histogram průměrů vláken pro vzorek PU 281.....	50
Obrázek 23: Snímky vzorku PU 200 pořízené na SEM při zvětšení 1500x a 5000x.....	51
Obrázek 24: Histogram průměrů vláken pro vzorek PU 200.....	51
Obrázek 25: Závislost filtrační účinnosti na průměru filtrovaných částic pro vybrané vzorky PU 281 a PU 200.....	52
Obrázek 26: Stanovení porovitosti suchý test (modrá přímka) a mokrá test (zelená křivka) pro vzorek PU 281.....	53
Obrázek 27: Distribuce velikosti pórů pro vzorek PU 281.....	53
Obrázek 28: Stanovení porovitosti suchý test (modrá přímka) a mokrá test (zelená křivka) pro vzorek PU 220.....	53
Obrázek 29: Distribuce velikosti pórů pro vzorek PU 220.....	54
Obrázek 30: Snímky vzorku PU 196 pořízené na SEM při zvětšení 1500x a 5000x.....	54
Obrázek 31: Histogram průměrů vláken pro vzorek PU 196.....	55
Obrázek 32: Snímky vzorku PU 186 pořízené na SEM při zvětšení 1500x a 5000x.....	55

Obrázek 33: Histogram průměrů vláken pro vzorek PU 186	56
Obrázek 34: Snímky vzorku PU 166 pořízené na SEM při zvětšení 1500x a 5000x	56
Obrázek 35: Histogram průměrů vláken pro vzorek PU 166	57
Obrázek 36: Závislost filtrační účinnosti na průměru filtrovaných částic pro vybrané vzorky PU 196 a PU 186.....	57
Obrázek 37: Snímky vzorku PLA 219 pořízené na SEM při zvětšení 1500x a 5000x	58
Obrázek 38: Histogram průměrů vláken pro vzorek PLA 219.....	59
Obrázek 39: Snímky vzorku PLA 221 pořízené na SEM při zvětšení 1500x a 5000x	59
Obrázek 40: Histogram průměrů vláken pro vzorek PLA 221	60
Obrázek 41: Snímky vzorku PLA 207 pořízené na SEM při zvětšení 1500x a 5000x.....	60
Obrázek 42: Histogram průměrů vláken pro vzorek PLA 207.....	61
Obrázek 43: Snímky vzorku PLA 205 pořízené na SEM při zvětšení 1500x a 5000x	61
Obrázek 44: Histogram průměrů vláken pro vzorek PLA 205	62
Obrázek 45: Snímky vzorku PLA 220 pořízené na SEM při zvětšení 1500x a 5000x	62
Obrázek 46: Histogram průměrů vláken pro vzorek PLA 220.....	63
Obrázek 47: Závislost filtrační účinnosti na průměru filtrovaných částic pro vzorky PLA 64	
Obrázek 49: Snímek vzorku PLA ($\chi = 3,22 \mu\text{S/cm}$) při zvětšení 5000x (vlevo) a snímek vzorku PBS ($\chi = 16,82 \mu\text{S/cm}$) při zvětšení 5000x (vpravo) pořízené na SEM.....	65
Obrázek 49: Snímek vzorku PBS 599 pořízené na SEM při zvětšení 1500x.....	67
Obrázek 50: Histogram průměrů vláken pro vzorek PBS 599	67
Obrázek 51: Snímek vzorku PBS 1500 pořízené na SEM při zvětšení 1500x	68
Obrázek 52: Histogram průměrů vláken pro vzorek PBS 1500	68
Obrázek 53: Snímky vzorku PBS/PU 146 pořízené na SEM při zvětšení 1500x a 5000x .	70
Obrázek 54: Histogram průměrů vláken pro PBS/PU 146.....	70
Obrázek 55: Snímky vzorku PBS/PU 173 pořízené na SEM při zvětšení 1500x a 5000x .	71
Obrázek 56: Histogram průměrů vláken pro vzorek PBS/PU 173	71
Obrázek 57: Snímky vzorku PBS/PU 153 pořízené na SEM při zvětšení 1500x a 5000x .	72
Obrázek 58: Histogram průměrů vláken pro vzorek PBS/PU 153	72
Obrázek 59: Snímky vzorku PBS/PU 162 pořízené na SEM při zvětšení 1500x a 5000x .	73
Obrázek 60: Histogram průměru vláken pro vzorek PBS/PU 162	73
Obrázek 61: Závislost filtrační účinnosti na průměru filtrovaných částic pro vzorky PLA a PBS/PU.....	74
Obrázek 62: Závislost filtrační účinnosti na průměru filtrovaných částic pro vzorky PLA, PBS/PU a PU	74
Obrázek 63: Závislost průměru vláken na střední velikosti pórů pro vzorky PU, PLA a PBS/PU.....	75

Obrázek 64: Snímek vzorku PLA spray při zvětšení 150x (vlevo) a snímek vzorku PLA síť při zvětšení 5000x (vpravo) pořízené na SEM	76
Obrázek 65: Histogram průměrů vláken pro PLA spray	77
Obrázek 66: Histogram průměrů vláken pro PLA síť	77
Obrázek 67: Závislost filtrační účinnosti v MPPS na tlakové ztrátě pro vzorky PLA spray, PLA síť a PP	79
Obrázek 68: Závislost filtrační účinnosti v MPPS na tlakové ztrátě pro vzorky PLA, PBS, PU a PBS/PU	79
Obrázek 69: Závislost filtrační účinnosti pro PLA nanostrukturu v kombinaci s PLA spray a PLA síť	80
Obrázek 70: Závislost filtrační účinnosti na průměru filtrovaných částic pro sendvičové kombinace PLA struktur.....	81
Obrázek 71: ePTFE Nitto, Japan.....	82
Obrázek 72: Holingsworth and Vose, Massachusetts, USA.....	82
Obrázek 73: Srovnání filtračních účinností pro FE >99,99 %.....	83
Obrázek 74: Srovnání filtračních účinností pro FE >99,97 %.....	83
Obrázek 75: Srovnání filtračních účinností pro FE >99,80 %.....	84

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Procesní parametry pro PU	45
Tabulka 2: Procesní parametry pro PLA	46
Tabulka 3: Procesní parametry pro PBS	46
Tabulka 4: Procesní parametry pro PBS/PU.....	47
Tabulka 5: Charakterizace PU nanostruktur, sumarizace proměnných ovlivňujících morfologii nanostruktury a filtrační vlastnosti	49
Tabulka 6: Charakterizace PLA nanostruktur, sumarizace proměnných ovlivňujících morfologii nanostruktury.....	63
Tabulka 7: Charakterizace PBS nanostruktur, sumarizace proměnných ovlivňujících morfologii nanostruktury a filtrační vlastnosti	66
Tabulka 8: Charakterizace PBS s $\chi = 17.8 \mu\text{S/cm}$	66
Tabulka 9: Charakterizace PBS/PU nanostruktur, sumarizace proměnných ovlivňujících morfologii nanostruktury a filtrační vlastnosti	69
Tabulka 10: Charakterizace PLA spray a PLA síť.....	78
Tabulka 11: Charakterizace PLA spray.....	78
Tabulka 12: Charakterizace PLA síť.....	78
Tabulka 13: Srovnání nejlepší materiálů.....	81

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Výhody a nevýhody metod pro výrobu nanovláken

PŘÍLOHA P I: VÝHODY A NEVÝHODY METOD PRO VÝROBU NANOVLÁKEN

Metoda výroby	Výhody	Nevýhody
Elektrostatické zvlákňování	Nanovlákná jsou dlouhá a souvislá. Průměry nanovláken jsou uniformní. Lze vyrobit širokou škálu průměrů. Flexibilita při výběru materiálu. Lze vytvářet různé nanostruktury.	Malá velikost pórů. Je obtížné vyrobit uniformní vlákna s průměrem menším než 50 nm
Samoskládání	Nanovlákná mohou být jednoduše modifikována a funkcionalizována	Obtížně dosažitelná objemová struktura. Nízká mechanická pevnost. Omezený výběr materiálů. Lze vyrobit pouze náhodná a krátká nanovlákná.
Fázová separace	Jednoduchost metody. Objemová struktura je snadno dosažitelná. Velké velikosti pórů s dobře definovanými nanostrukturami.	Omezený výběr materiálů. Lze vyrobit pouze náhodná a krátká nanovlákná
Mezifázová polymerace	Snadnost výroby ve velkém měřítku s vysokým výtěžkem uniformních nanovláken. Dispergovatelnost nanovláken ve vodě pro ekologické zpracování a biologické aplikace. Velký výběr rozpouštědel, kyselin, reakčních teplot a koncentrací reaktantů. Morfologie prostřednictvím volby kyseliny a koncentrace kyseliny.	Nutnost čištění po výrobě. Použití organických rozpuštědel.
Hydrotermální syntéza	Vysoká výnosnost. Levná metoda. Snadná výroba.	Kontaminace nanostruktur. Shlukování a aglomerace nanostruktur v roztoku během růstu.

<p>Rychle iniciovaná polymerace</p>	<p>Velký výběr kyselin, reakčních teplot a koncentrací reaktantů s řízením morfologie nanovláken prostřednictvím volby kyseliny, reakční teploty, reakčního média a rychlosti mechanického míchání. Proces šetrný k životnímu prostředí, protože nejsou potřebná žádná organická rozpouštědla.</p>	<p>Nutnost čištění po výrobě.</p>
<p>Šablonová syntéza</p>	<p>Dobrá kontrola uspořádání nanovláken. Řízený růst nanovláken.</p>	<p>Nerovnoměrná výplň pórů. Kontaminace ze šablony. Degradace šablony při delších polarizacích. Malá krystalinita.</p>
<p>Růst pára-kapalina-pevná látka</p>	<p>Bezdefektové 1D struktury.</p>	<p>Vysoké teploty potřebné pro zpracování, proto nelze provádět výrobu na plastových a skleněných substrátech.</p>