

Vliv nanočástic siliky na smáčivost filmů a nanovláken z poly(etylen oxidu)

Michaela Brázdová

Bakalářská práce
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav fyziky a mater. inženýrství
akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michaela Brázdová**
Osobní číslo: **T15892**
Studijní program: **B2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vliv nanočástic siliky na smáčivost filmů a nanovláken z poly(etylen oxidu)**

Zásady pro vypracování:

Výroba nanovláknenných vrstev a filmů s různým stupněm smáčivosti povrchu je v dnešní době velmi žádoucí, zejména pro svůj vysoký aplikační potenciál. Práce bude zaměřena na přípravu polymerních roztoků s přídavkem plniva s hydrofobizovaným povrchem. V rámci práce budou porovnány různé typy plniv. Zvláštní důraz bude kladen na přípravu roztoků z různých typů rozpouštědel včetně způsobu inkorporace částic do polymerního roztoku pro výrobu kvalitních nanovláknenných vrstev a filmů.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury: **viz příloha**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martina Polášková, Ph.D.**

Ústav inženýrství polymerů

Datum zadání bakalářské práce: **2. února 2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **18. května 2018**

Ve Zlíně dne 28. února 2018


doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan




doc. Mgr. Aleš Mráček, Ph.D.
ředitel ústavu

Příloha zadání bakalářské práce

Seznam odborné literatury:

1. Baji A., Mai Y. W., Wong S. C., Abtahi M., Chen P.; Electrospinning of polymer nanofibres: Effects on oriented morphology, structures and tensile properties; *Composites Science and Technology*; 2010; 70; 703-718; DOI: 10.1016/j.compscitech.2010.01.010.
2. Ewen M., Peter K., Reichelt N., Rätzsch M., Höcker H.; Effect of holding surfaces on the Wettability of compression molded polypropylene films; *Die Angewandte makromolekulare Chemie*; 1999; 265, 36-41.
3. Higham A. K., Tang C., Landry A. M., Pridgeon M. C., Lee E. M., Andraday A. L., Khan S. A.; Foam Electrospinning: A multiple jet, needle-less process for nanofiber production; *American Institute of Chemical Engineers*; 2014; 60; 1355-1364; DOI: 10.1002/aic.14381.
4. Zhao W., Su Y., Gao X., Xu J., Wang D.; Interfacial effect on confined crystallization of Poly(ethylene oxide)/ silica composites; *Journal of Polymer Science*; 2015; 54; 414-423; DOI: 10.1002/polb.23915.
5. Palangetic L., Reddy N. K., Srinivasan S., Cohen R. E., McKinley G. H., Clasen C.; Dispersity and spinnability: Why highly polydisperse polymer solution are desirable for electrospinning; *Polymer*; 2014; 55; 4920-4931; DOI: 10.1016/j.polymer.2014.07.047.
6. Morota K., Matsumoto H., Mizukoshi T., Konosu Y., Minagawa M., Tanioka A., Yamagata Y., Inoue K.; Poly(ethylene oxide) thin films produced by electrospray deposition: Morphology control and additive effects of alcohols on nanostructure; *Journal of colloid and Interface Science*; 2004; 279; 484-492; DOI: 10.1016/j.jcis.2004.06.075.
7. Israelachvili J.N.; *Intermolecular and surface forces*; Elsevier Science; 2011.
8. Dufficy M.K., Geiger M.T., Bonino Ch.A., Khan S.A.; Electrospun ultrafine fiber composites containing fumed silica: From solution rheology to materials with tunable wetting; *Langmuir*; 2015; 31; 12455-12463; DOI: 10.1021/acs.langmuir.5b03545.

Příjmení a jméno: BRÁZDOVA MICHAELA

Obor: Materiálové inženýrství

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou 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 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou 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);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské 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.

Ve Zlíně



¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ 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, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

³⁾ 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, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce popisuje ovlivnění smáčivosti filmů a nanovlákných vrstev vyrobených z poly(etylen oxidu). Sledujeme změnu kontaktního úhlu smáčení v závislosti na použitém rozpouštědle a druhu siliky. Cílem práce bylo najít nejvhodnější kombinace rozpouštědla a siliky pro dosažení co nejvyššího úhlu smáčení.

Klíčová slova: PEO, smáčení, kontaktní úhel, silika

ABSTRACT

This bachelor thesis describes influence of wettability of films and nanofibrous layers made of poly(ethylene oxide). The change of contact angle is monitored depending on the used solvent and type of fumed silica. The aim of the thesis was find the most suitable combination of solvents and fumed silica to achieve the highest wetting angle.

Keywords: PEO, wetting, contact angle, fumed silica

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucí bakalářské práce Ing. Martině Poláškové, Ph.D. za odborné vedení při psaní této práce, za cenné rady a trpělivost při konzultacích. Dále děkuji Ústavu hydrodynamiky Akademie věd České Republiky za poskytnutý materiál pro experimentální část. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat svým rodičům za podporu během celé doby studia.

„Vzdělání je ta nejsilnější zbraň, kterou lze změnit svět.“

Nelson Mandela

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

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 POLY(ETYLEN OXID)	11
1.1 POLY(ETYLEN OXID) V ROZTOKU	12
1.2 PLNIVA	15
1.3 ELEKTROSTATICKÉ ZVLÁKŇOVÁNÍ.....	16
1.3.1 Parametry ovlivňující elektrostatické zvláknování	17
2 FÁZOVÁ ROZHRANÍ	18
2.1 KONTAKTNÍ ÚHEL SMÁČENÍ	19
2.2 METODY MĚŘENÍ KONTAKTNÍHO ÚHLU SMÁČENÍ	20
2.2.1 Přímé metody	20
2.2.2 Nepřímé metody	21
2.3 SMÁČIVOST	22
II PRAKTICKÁ ČÁST	23
3 PŘÍPRAVA ROZROKŮ	24
3.1 PŘÍPRAVA VZORKŮ	25
4 MĚŘENÍ	27
5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ	29
5.1 POLYMERNÍ FILMY	29
5.1.1 Vliv použitého rozpouštědla a koncentrace u čistých roztoků.....	30
5.1.2 Vliv přídavku siliky.....	31
5.1.3 Další vlivy	35
5.2 POLYMERNÍ NANOVLÁKNA.....	39
5.2.1 Vliv použitého rozpouštědla	40
5.2.2 Vliv přídavku siliky.....	41
5.2.3 Další vlivy	46
6 ZÁVĚR	50
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	51
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	54
SEZNAM OBRÁZKŮ	55
SEZNAM TABULEK	56
SEZNAM GRAFŮ	57
SEZNAM PŘÍLOH	58

ÚVOD

Poly(etylen oxid) zaujímá prominentní postavení mezi syntetickými polymery, jelikož je jako jeden z mála rozpustný ve vodě. Samotná rozpustnost je řízená relativní molekulovou hmotností, její distribucí a termodynamickými podmínkami při procesu rozpouštění. Kromě vody je rozpustný i v dalších polárních rozpouštědlech, jako je etanol, metanol, popřípadě v jejich kombinacích. Snadné rozpouštění v těchto levných a environmentálně bezpečných rozpouštědlech dává možnosti zpracovávat jej do finálních výrobků z roztoků technologiemi jako jsou například odlévání filmů či elektrostatické zvlákňování.

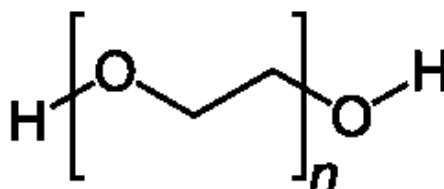
Vlastnosti takto připravených filmů a nanovlákných vrstev lze modifikovat zamícháním různých typů plniv do polymerního roztoku. V závislosti na vzájemných interakcích mezi plnivem, polymerem a rozpouštědlem se docílí různého stupně dispergace plniva na povrchu a v objemu finálních vzorků a tím i rozdílných vlastností. Kombinací hydrofilního polymeru a hydrofobizovaného plniva lze předpokládat fázovou separaci plniva k povrchu vzorku a tím řídit smáčivost daného polymerního povrchu.

Cílem práce je popsání vlivu koncentrace polymeru v roztoku, použitého typu rozpouštědla a plniva na výslednou smáčivost poly(etylen oxidových) filmů a nanovlákných vrstev. Za tímto účelem byly testovány dvě koncentrace poly(etylen oxidu) ve dvou různých rozpouštědlech a dva typy silik s odlišně hydrofobizovaným povrchem. Homogenita připravených povrchů je posuzována mapováním změny kontaktního úhlu na předem definované ploše vzorku.

I. TEORETICKÁ ČÁST

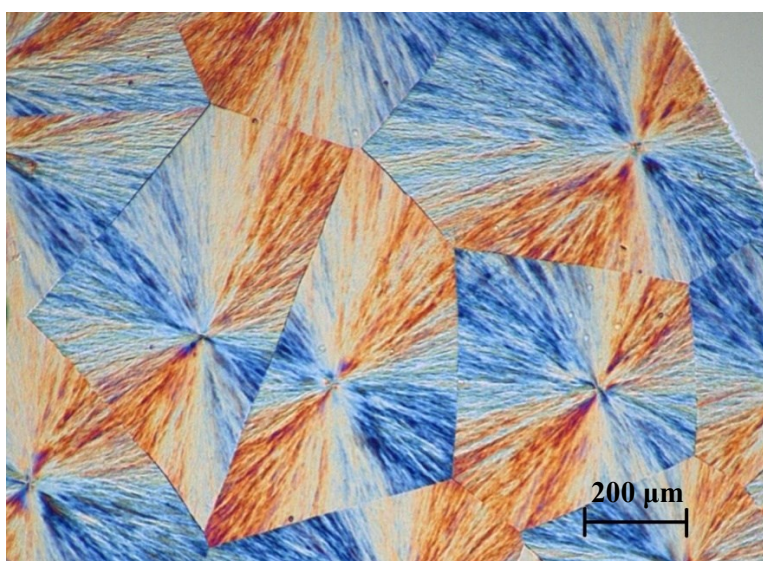
1 POLY(ETYLEN OXID)

Jedná se o semikrystalický, hydrofilní polymerní materiál s lineární strukturou, jehož systematický název je poly(oxyetylen). Na Obrázku 1 je znázorněn jeho strukturní vzorec. Je složen z opakujících se jednotek etylenoxidu.



Obrázek 1 Strukturní vzorec poly(etylen oxidu)

Roku 1859 jej nezávisle na sobě izolovali A. V. Laurenc a Ch. A. Wurtz. Vyrábí se reakcí etylen oxidu, přičemž podle použitého katalyzátoru běží polymerace aniontovým nebo kationtovým mechanismem. Vysokomolekulární poly(etylen oxid) je pak syntetizován suspenzní polymerací, kde se používají organokovové katalyzátory.¹



Obrázek 2 Sférolity polyetylen oxidu v polarizačním mikroskopu s kompenzátorem

Jak je zobrazeno na Obrázku 2, poly(etylen oxid) tvoří opticky negativní sférolity s typickým maltézským křížem. Jednou z jeho nesporných výhod je biokompabilita a komerční dostupnost ve velkém množství molekulových hmotnostech. Na základě molární hmotnosti se rozlišuje mezi poly(etylen oxidem) a poly(etylen glykolem). Pod hranicí 20 000 g/mol se jedná o polyetylen glykol, který bývá především ve formě kapaliny.

Nad tuto hranici jde o nízkotající tuhou látku nazývanou poly(etylen oxid). Poly(etylen oxid) má obecně užívanou zkratku PEO.

S molární hmotností polymeru se mění i jeho vlastnosti. Toto chování je znázorněno v Tabulce 2. Vzrůstá i bod tání, který se pohybuje od 65 °C do 72 °C. Pro experimentální část této práce byl použit PEO o molární hmotnosti 300 000 g/mol.

Tento polymer má velmi nízkou toxicitu a i přesto, že není biodegradabilní, je pro živý organismus neškodný a může být snadno vyloučen.²

PEO má řadu významných aplikací. V současnosti je v medicíně využíván především poly(etylen glykol), který je součástí řady laxativ a používá se i jako přísada do léčiv s řízenou distribucí.^{2,3} V potravinovém průmyslu je znám jako protipěňivý přípravek E 1521. Za zmínku určitě stojí jedna z jeho zajímavých aplikací, kdy se využít jako konzervační prostředek u Terakotové armády, kde chrání barvy před opadáváním.⁴

PEO se využívá jako kovalentní modifikátor biologických makromolekul. Dále je zde velký potenciál využití nanovláken v antibakteriálních tkaninách, do matric pro tkáňové inženýrství, jako biomateriál pro regeneraci kostí a měkkých tkání a jako prosévací matrice pro RNA kapilární elektroforézu.^{5,6,7} Jiné využití nachází také jako přísada zlepšující mechanické vlastnosti polyvinylidenfluoridových filtrů, a protože je snadno zvláknitelný, často se přidává například k chitosanu, alginátu a kyselině hyaluronové, které jsou samy o sobě obtížně zvláknitelné.^{6,8,9}

1.1 Poly(etylen oxid) v roztoku

Jelikož k zvláknování dochází mimo taveniny především z roztoků, je třeba věnovat pozornost také chování makromolekul v roztoku. O tom, jestli se v rozpouštědle polymer bude rozpouštět rozhoduje polarita. Polymer s polární funkční skupinou se bude rozpouštět v polárním rozpouštědle a polymer s nepolární funkční skupinou v nepolárním rozpouštědle. V Tabulce 1 jsou uvedeny příklady rozpouštědel, v nichž je tento polymer dobře rozpustný. PEO je u většiny rozpouštědel rozpustný již při pokojové teplotě, ale u aromatických rozpouštědel je rozpustnost účinnější při zvýšení teplotě.

V roztoku se nachází různě svinuté řetězce. Stupeň svinutí ovlivňují interakce polymer-polymer, polymer-rozpouštědlo a interakce mezi molekulami rozpouštědla. Podle svinutí makromolekul v rozpouštědle se dělí na ta dobrá, špatná a tzv. theta rozpouštědla.

V dobrém rozpouštědle se makromolekula snaží rozvinout a vystavit se vlivu rozpouštědla, klubko zvětšuje svůj objem a botná.

Tabulka 1 Rozpustnost poly(etylen oxidu) v ukázce rozpouštědel

Rozpouštědlo	Teplota rozpuštění [°C]	Teplota srážení [°C]	Parametr rozpustnosti [$10^{-3} J^{1/2} m^{-3/2}$]
voda	25	< 0	47,9
acetonitril	25	< 0	-
dichlor etylen	25	< 0	-
trichlor etylen	25	< 0	-
dichlor metylen	25	< 0	-
chloroform	25	< 0	19,0
benzen	25	2	-
methanol	30	20	-
toluen	30	20	18,2
xylen	30	20	18,0
aceton	35	20	20,3
ethanol	45	31	26,0
n-butanol	50	33	-

Ve špatném rozpouštědle má klubko tendenci se ještě více svinout a spíše dochází k interakcím mezi jednotlivými segmenty makromolekuly než s molekulami rozpouštědla. Théta rozpouštědla jsou ta, kde jsou interakce vyrovnány.²³ PEO je rozpustný v řadě rozpouštědel jako je voda, metanol, etanol, acetonitril, benzen a nerozpustný v diethyl éteru a hexanu. V závislosti na čistotě vody může ve vodných roztocích PEO tvořit agregáty. S teplotou rozpustnost ve vodě stoupá, avšak v blízkosti bodu varu se snižuje a může dojít k separaci obou fází.¹

Jak již bylo zmíněno, viskozitu PEO ovlivňuje především molekulová hmotnost, s jejím nárůstem výrazně stoupá.

Tabulka 2 Závislost molární hmotnosti na viskozitě a teplotě tání pro PEO ve vodě ²⁵

Molekulová hmotnost [g/mol]	Viskozita při 25°C [Pa·s]			Teplota tání [°C]
	5 % roztok	2 % roztok	1 % roztok	
100.000	0,030-0,050			65
200.000	0,055-0,090			
300.000	0,6-1,2			
900.000	8,8-17,6			
2.000.000	2-4			
4.000.000	1,65-5,50			
5.000.000	5,5-7,5			
7.000.000	7,5-10,0			

1.2 Plniva

Plniva mají významný podíl na výsledných vlastnostech polymeru. Jejich přidávkem se dají ovlivňovat mechanické vlastnosti, odolnost, povrchová úprava jako například smáčivost materiálu, hustota, viskozita, optické vlastnosti, barva, životnost materiálu, či mohou sloužit jen jako neaktivní složka, která nadstavuje polymerní směs a tím snižuje cenu materiálu.¹⁰

Interakci mezi polymerem a plnivem ovlivňuje hned několik faktorů. Mohou to být chemická vazba, kompatibilita a koncentrace plniva. Zvyšující se koncentrace plniva má za následek snižování průměrné vzdálenosti částic a omezení pohybu řetězců. Vazba mezi polymerem a plnivem může vzniknout v důsledku různých faktorů. Patří mezi ně i mechanické zapleteniny, vytvoření elektrostatické přitažlivosti, nebo povrchovým ukotvením částic. V neposlední řadě je interakce ovlivněna povrchovou úpravou plniva.¹¹

Jedním z plniv, které mají vliv na výsledné vlastnosti je silika. Jde o uměle vyráběný čistý oxid křemičitý. Vyrábí se ve dvou formách. Buď povrchově neupravená, pyrogenní, která je hydrofilní, či upravená, která je hydrofobní. Právě její silná hydrofobicita se využívá k úpravě smáčivosti materiálů. Jedná se o látku s velmi velkým měrným povrchem.

Na trh je dodávána pod obchodním názvem AEROSIL® a jednotlivé typy se od sebe dělí velikostí povrchu. V této práci byla použita silika AEROSIL® R805, jejíž velikost částic je 10-12 nm a povrch zaujímá 150 m²/g a AEROSIL® R8012 s velikostí částic 8 nm a povrchem velkým 260 m²/g.

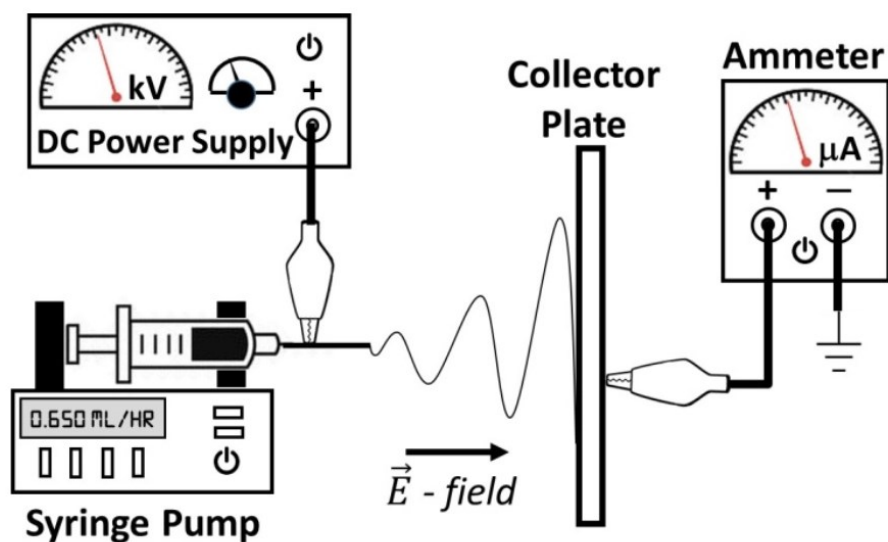
Její přidávek k polymerům může výrazně ovlivnit jejich chování v plamenu. Používá se proto jako retardant hoření.¹² Mimo její využití jako plnivo do polymerních látek se dále používá v zubních pastách a kosmetice.

Jelikož při snaze zapracovat siliku do roztoku má neustále tendenci se separovat na povrchu, je nutné využít dispergační činidlo. To snižuje povrchové napětí mezi dvěma látkami, čímž napomáhá zapracovat siliku do polymerního roztoku. Pro tyto účely byl použit komerční výrobek Tween 40, jehož systematický název je polyoxyetylen-sorbitanmonopalmitát, jinak je také značen jako E 434.

1.3 Elektrostatické zvlákňování

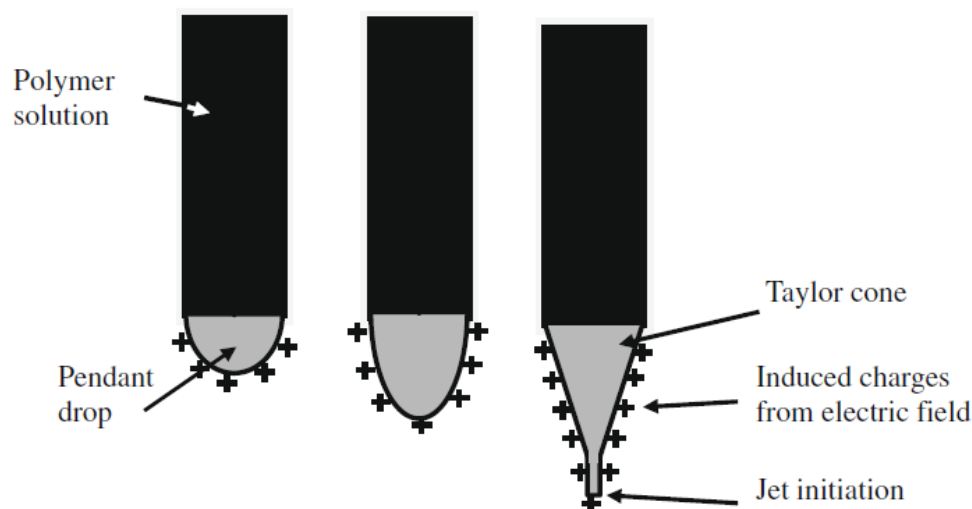
Jednou z metod zpracování PEO je elektrosinning, neboli elektrostatické zvlákňování. Tato technologie je známá už více než 60 let, avšak největší rozmach zažívá v posledním desetiletí.¹³ Elektrostatickým zvlákňováním jsou získávána nanovlákná, která mají tloušťku od několika μm po 2 nm. Díky schopnosti řízení poréznosti mohou být použita v širokém odvětví aplikací. Od nanokatalyzátorů, lešení ve tkáňovém inženýrství, v biomedicině a farmácii až po filtry a využití v optických a chemických senzorech.^{13,9}

Zařízení na elektrostatické zvlákňování se obecně skládá ze tří částí základních částí: zdroje vysokého napětí, kapiláry a sběrné elektrody. Schéma aparatury je znázorněno na Obrázku 3.



Obrázek 3 Schéma aparatury na elektrostatické zvlákňování z roztoku¹⁴

Podstatou této metody je využití elektrostatických sil k výrobě jemných nanovláken z polymerního roztoku či taveniny. Pro úspěšný elektrosinning je nutné dodávat napětí v řádu několika desítek kV. Polymerní roztok je přiváděn do kapiláry, na jejíž špičce se vytváří kapka. Samotná kapilára je vodivě spojena se sběrnou elektrodou, která je umístěna do určité vzdálenosti od kapiláry. Jakmile je zapnuto vysoké elektrické napětí, dojde vlivem Maxwellova napětí k natažení kapky a vytvoření Taylorova kužele (Obrázek 4). Poté co jsou kohezní síly převýšeny silami elektrostatickými, vzniká proud polymerního roztoku. Nabitý proud se pak pohybuje od kapiláry ke sběrné elektrodě a tím dochází k dlužení, vypařování kapaliny a tuhnutí vlákná.^{13,15,16}



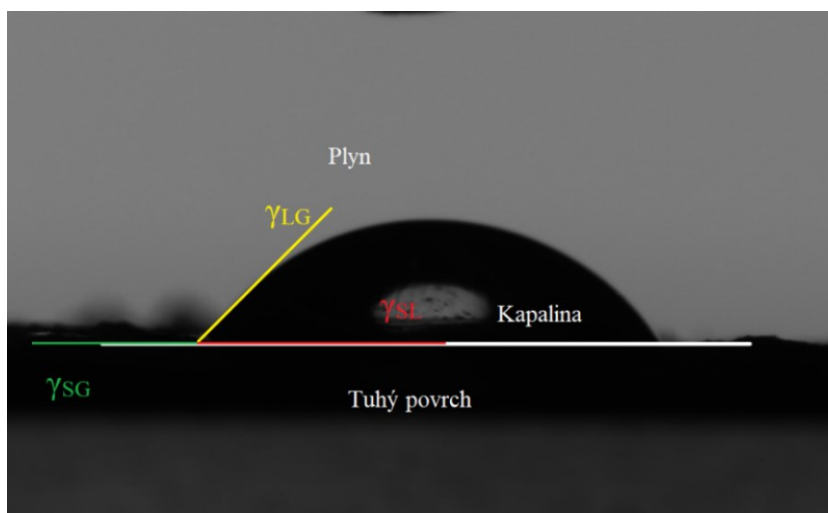
Obrázek 4 Vznik Taylorova kužele vlivem Maxwellova napětí z kapky na konci kapiláry¹⁶

1.3.1 Parametry ovlivňující elektrostatické zvlákňování

Změna řady parametrů, jako jsou vlastnosti zvlákňovaného roztoku, okolní podmínky a nastavení aparatury má významný vliv na morfologii nanovláken. Například průměr vlákna roste s rostoucí viskozitou roztoku či jeho koncentrací. Pokud je viskozita příliš nízká, není možné připravit spojitá vlákna.¹³ S rostoucí vodivostí roztoku a použitým napětím průměr nanovláken klesá. Pokud je vzdálenost mezi hrotem stříkačky a podložkou na níž se uchytávají vznikající nanovláken příliš malá nebo naopak velká, tak po jejich délce vznikají tzv. korálky. Stejný problém nastává i při vzrůstající molekulové hmotnosti. Nezanedbatelný vliv pak mají i okolní podmínky při zvlákňování. S rostoucí vlhkostí vznikají na nanovláken velké póry a s teplotou opět klesá průměr.^{13,16}

2 FÁZOVÁ ROZHRAŇÍ

K veškerým povrchovým interakcím dochází právě na rozhraní fází, přesněji na pomezí povrchu pevné látky a okolí, které může tvořit vzduch, kapalina, či další pevná látka. I při smáčení povrchu jde o kontakt několika fází, což je znázorněno na obrázku 5.



Obrázek 5 Silová rovnováha na rozhraní tří fází

Jako fázové rozhraní je brána oblast, kde se stýkají dvě odlišné fáze. Vlastnosti této oblasti jsou ovlivněny vlastnostmi obou přilehlých částí. Jako fáze je označena oblast objemu, ve které jsou její vlastnosti konstantní, či se spojitě mění v prostoru. Obsahuje-li systém více fází, nazývá se heterogenní systém.

Podle skupenství fází se rozlišují rozhraní:

- rozhraní kapalina/plyn (l/g)
- rozhraní kapalina/kapalina (l/l)
- rozhraní pevná látka/plyn (s/g)
- rozhraní pevná látka/kapalina (s/l)
- rozhraní pevná látka/pevná látka (s/s)

Rozhraní kapalina/plyn a kapalina/kapalina jsou označovány jako mobilní rozhraní.¹⁷

Vícefázové systémy mají tendenci uspořádat se tak, aby součet jejich potenciálních energií a energií fázových rozhraní byl minimální. Jak je znázorněno na obrázku 4, při styku na rozhraní pevná látka kapalina jsou uplatňovány tři mezifázové energie:

- mezifázová volná energie mezi pevnou látkou a plynem γ_{SG}
- mezifázová volná energie mezi pevnou látkou a kapalinou γ_{SL}
- mezifázová volná energie mezi kapalinou a plynem γ_{LG}

2.1 Kontaktní úhel smáčení

Kontaktní úhel, jinak také nazývaný úhel smáčení, je jedna z charakteristik materiálu. Popisuje smáčivost pevného materiálu kapalinou pomocí Youngovy rovnice (Rovnice 1).

Rovnice 1 Youngova rovnice pro výpočet kontaktního úhlu smáčení

$$\gamma_{SG} - \gamma_{SL} = \gamma_{LG} \cos \theta$$

kde γ_{SG} je mezifázová volná energie mezi pevnou látkou a plynem, γ_{SL} mezifázová volná energie mezi pevnou látkou a kapalinou, γ_{LG} mezifázová volná energie mezi kapalinou a plynem a θ je úhel smáčení.¹⁸ V praktické části práce je dále označován zkratkou CA, která vychází z anglického názvu contact angle.

K dosažení stabilního a rovnovážného stavu kontaktních úhlů je potřeba dodržet podmínky jako je hladkost, neměnnost a pevnost povrchu, kompoziční homogenita a zabránit rozpustnosti pevné látky v kapalině, používané k měření. Jelikož je v praxi velmi obtížné dodržet tyto podmínky, dochází k hysterezi kontaktního úhlu. Ta označuje rozdílnost úhlu smáčení při postupu a ústupu kapaliny po pevném povrchu.

Obecně se kontaktní úhel používá k vypočítání povrchových energií. V této práci je ale použit sám pro charakterizaci povrchu z pohledu smáčivosti.

2.2 Metody měření kontaktního úhlu smáčení

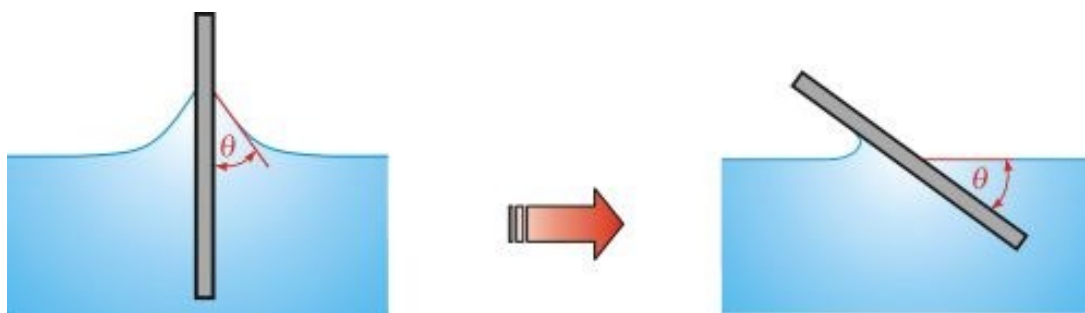
Kontaktní úhel lze obecně stanovit dvěma způsoby, přímou a nepřímou metodou.²³

2.2.1 Přímé metody

Přímé metody jsou založeny na goniometrickém měření, patří mezi ně:

1. Měření úhlu smáčení na naklánějící se destičce

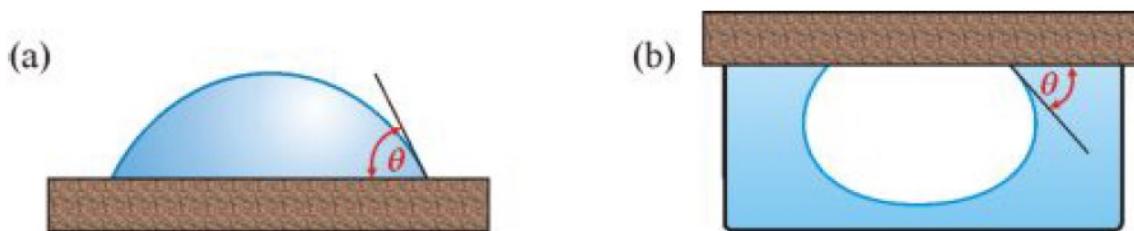
Jedná se o nejjednodušší a nejstarší metodu. Destička zkoumaného materiálu je z části ponořena do kapaliny a následně nakláněna do doby, než je povrch kapaliny na jedné straně destičky rovný až k čáře styku mezi deskou a kapalinou. V tom okamžiku svírá hladina kapaliny s rovinou destičky právě úhel θ . Princip je zobrazen na Obrázku 6. Nevýhodou této metody je, že naměřený kontaktní úhel smáčení se nachází mezi postupujícím a ustupujícím úhlem.



Obrázek 6 Měření úhlu smáčení na nakloněné desce²³

2. Měření úhlu smáčení na přisedlé kapce nebo přilínající bublině

Metoda přisedlé kapky (Sessile drop) je nejčastější používaná technika pro rovné povrchy. Je založena na analýze deformovaného tvaru kapky, která je umístěna na pevném podkladu. K měření je potřeba goniometrického okuláru, díky němuž je měřen kontaktní úhel z profilu kapky. Kontaktní úhel je určen tečnou sedící kapky v místě kontaktu kapaliny s pevnou látkou. Tu snímá videokamera, obraz přenáší do počítače a tam je kapka pomocí vhodného softwaru vyhodnocena. Podstata této metody je znázorněna na Obrázku 7.



Obrázek 7 Přisedlá kapka (a) a přilínající bublina (b)²³

Právě metodou měření úhlu smáčení na přisedlé kapce se zabývá tato práce. Samotné provedení je pak popsáno v praktické části v kapitole Měření.

2.2.2 Nepřímé metody

Nepřímé metody jsou založeny na tenziometrickém měření, případně na geometrické analýze tvaru menisku. Patří mezi ně:

3. Kapilární elevace na svislé destičce

U této metody se měří výška, do jaké vystoupí meniskus na svislém povrchu destičky, která je ponořena do kapaliny. Přesnost metody je závislá na přesnosti určená výšky menisku.

4. Vyvažování Wilhelmyho destičky

Měří se zde síla potřebná k vyvážení destičky svisle ponořené do kapaliny. Při ponořování destičky je získán postupující úhel a při zpětném pohybu úhel sestupující.

5. Analýza profilu kapky (metoda ADSA)

Jedná se o výpočetní metodu, kdy se z dosedající kapky na základě trigonometrie vypočítá kontaktní úhel. Metoda vychází z toho, že základem kapky je kruh. Tím však vzniká nepřesnost, protože kvůli různorodosti povrchu pevných látek má kapka jen zřídka přesně kulovitý tvar.

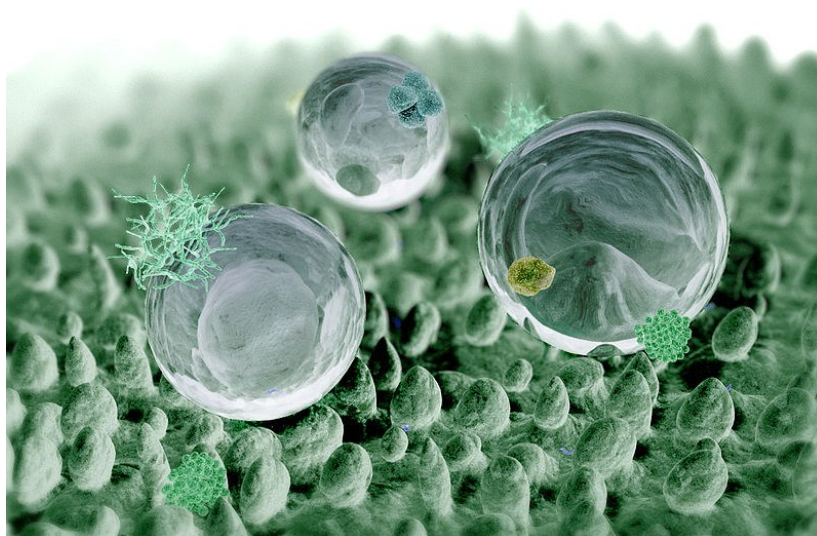
2.3 Smáčivost

Podle aplikace polymeru se upravují jeho vlastnosti. Jak bylo v kapitole o plnivech zmíněno, jejich přidavkem můžeme měnit řadu parametrů. Mezi ně určitě patří i povrchová úprava, jako v tomto případě smáčivost materiálu.

Smáčivost je projevem adhezních sil při kontaktu kapaliny s pevnou látkou, jinými slovy to je schopnost kapalin přilnout k povrchu určitých pevných látek.¹⁸ Projevují se zde přitažlivé síly mezi částicemi povrchových vrstev dvou různých stýkajících se látek. Účinnost smáčení závisí na druhu kapaliny a pevné látky.¹⁹ Obecně platí, že povrch je smáčivý, pokud kontaktní úhel je menší než 90° a nesmáčivý, pokud je úhel větší. Pokud je testovací kapalina voda, mluvíme o hydrofobním, či hydrofilním povrchu.

Jednou z ukázek vysoké hydrofobicity povrchu materiálu je tzv. lotosový efekt, který je znázorněn na Obrázku 8. Jedná se o efekt, kdy úhel smáčení dosahuje hodnot vyšších než 150° . Kombinují se zde povrchové vlastnosti, ale i chemické složení. Materiály s touto vlastností jsou přirozeně samočisticí. Nečistoty se na jejich povrchu neudrží a kapička vody se spolu s nečistotami odvalí z povrchu pryč.²⁰

Snaha o připravení co nejvíce nesmáčivého povrchu je v první řadě hnána touhou po samočisticích površích. Ty by se daly využít na samočisticí okna, jako ochrana střešních krytin, solárních panelů a dále všude tam, kde hrozí biologické znečištění.



Obrázek 8 Ukázka superhydrofobicity – Lotosový efekt²⁴

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 PŘÍPRAVA ROZROKŮ

Jak je uvedeno v Tabulce 2, PEO je mimo vodu rozpustný i v řadě organických rozpouštědel. Nejvýhodnější je přesto práce s vodou, jelikož se jedná o levné, dostupné a netoxické rozpouštědlo.

Jako rozpouštědlo byla zvolena voda a roztok etanolu s vodou v poměru 3:2.²¹ Pro každé rozpouštědlo a koncentraci pak byl připraven vzorek polymeru v čistém rozpouštědle a vzorek polymeru v rozpouštědle s plnivem. V několika případech bylo navíc přidáno i dispergační činidlo. Pracovalo se s 7 a 9 hm. % roztoky, vzorky s plnivem obsahovaly navíc 2 hm. % siliky, případně i 0,1 hm. % dispergačního činidla. Přesné složení je uvedeno v Tabulce 3.

Tabulka 3 Receptura pro přípravu roztoků

	PEO	FS	Rozpouštědlo	Dispergační činidlo	Celková hmotnost
7 hm. % roztok [g]	1,75	0,5	22,725	0,025	25
9 hm. % roztok [g]	2,25	0,5	22,225	0,025	25

Jako plnivo zde byla použita silika, která by svou výraznou hydrofobitou měla ovlivnit výsledný kontaktní úhel smáčení polymeru. Byly použity dva druhy, a to silika AEROSIL® R805, jejíž velikost částic je 10-12 nm a povrch zaujímá 150 m²/g a AEROSIL® R8012 s velikostí částic 8 nm a povrchem velkým 260 m²/g.

K rozpouštění polymeru PEO o molekulové hmotnosti 300 000 g/mol docházelo ve vodní lázni při teplotě 50 °C na vyhřívaném míchadle po dobu několika hodin v závislosti na použitém rozpouštědle. V roztocích s etanolem byl PEO rozpuštěn téměř ihned, kdežto vodné roztoky byly rozpouštěny až několik hodin. Během rozpouštění polymer nejprve vytvořil na dně gelovitou sedlinu, která se postupně pomocí magnetického míchadla rozpouštěla. V průběhu stání roztoků bylo odpozorováno, že polymer má po nějaké době tendenci opět sedat na dno a vytvářet gel. Proto bylo nutné před každým měřením veškeré vzorky znovu promíchat.

Největší problém však bylo zapracování siliky do roztoku. I přes několikahodinové míchání měla neustále tendenci se na povrchu odseparovat.

Proto zde proběhl i pokus se zapracováním siliky do roztoku pomocí sonikace, což je metoda k homogenizaci směsí pomocí ultrazvukové sondy.²⁶ K sonikaci docházelo sonotrodou tvaru kužele o průměru 3 mm po dobu 20 min.²² Parametry sonikace jsou shrnuty v Tabulce 4. Kvůli odvodu tepla vznikajícího při sonikaci, byly vzorky umístěny ve vodní lázni.

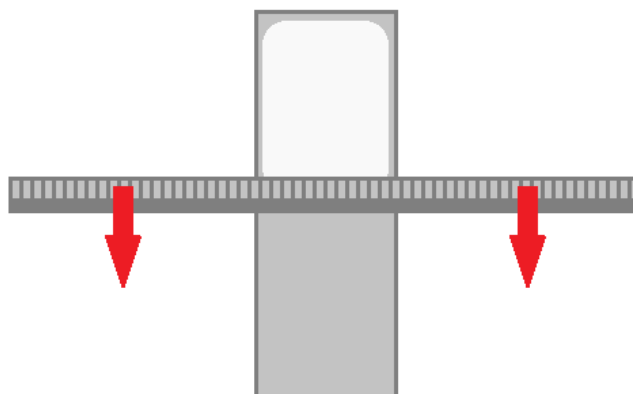
Tabulka 4 Parametry sonikace

Intenzita	Frekvence	Cyklus	Amplituda
200 W	24 kHz	0,5	60 %

3.1 Příprava vzorků

Měření probíhalo na dvou typech povrchů. Jedním z nich byly polymerní filmy a další elektrostaticky zvlákněná nanovlákná.

Polymerní filmy byly připraveny tak, že se kapka polymerního roztoku nanasla na podložní sklíčko obalené hliníkovou fólií a rozetřela se rychlým pohybem pomocí spirálového pravítka. Postup nanášení polymerního roztoku je znázorněn na Obrázku 9. Hliníková fólie byla použita především z toho důvodu, aby byly zajištěny totožné podmínky pro měření jako u polymerních nanovláken, která jsou zvlákněna na podklad právě z hliníkové fólie. Takže kdyby případně došlo k ovlivnění podkladem, bude v obou případech stejné. Spirálové pravítko je vlastně kovová tyč, po jejíž délce je vinutí, díky němuž dojde k rovnoměrnému nanesení vrstvy polymeru.



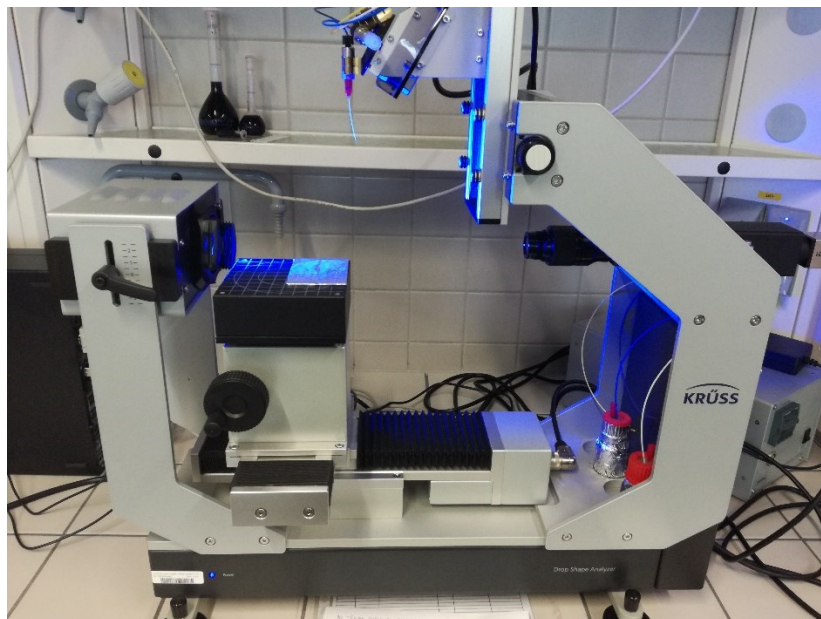
Obrázek 9 Příprava polymerního filmu pomocí spirálového pravítka

Takto připravené a již suché vzorky byly před měřením ještě ofouknuty sterilním vzduchem, aby byly odstraněny případné částičky prachu a jiných nečistot.

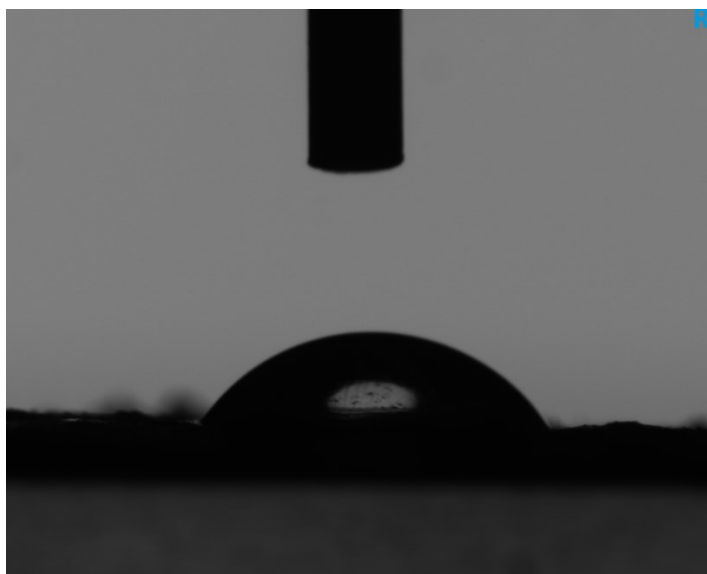
Nanovláknna byla připravována výše popsanou metodou elektrospinning. Ke zvlákňování docházelo především napětím 25 kV ze vzdálenosti 20 cm. Pro zkoumání vlivu použitého napětí pak bylo použito ještě 20 kV a 30 kV. Veškerá nanovláknna byla zvlákněna na Ústavu hydrodynamiky Akademie věd. Nanovláknna byla nachytána na hliníkovou folii a z ní vystřížený vzorek byl přichycen k podložnímu sklíčku pomocí oboustranné lepicí pásky tak, aby se docílilo co nejrovnějšího povrchu. Pokud by se hliníková folie v nějakém místě vlnila, či vytvářela hranu, znemožnilo by to kameře snímat správně základní rovinu podle níž se kontaktní úhel počítá. Pro měření byl vždy zvolena oblast, kde bylo největší pokrytí fólie vlákny. Vzorek s nanovláknny se neofukoval, neboť by mohlo dojít k polámání a poničení nanovláknenné vrstvy.

4 MĚŘENÍ

Měření probíhalo na systému pro automatické měření kontaktního úhlu smáčení typu DSA30 od značky Krüss metodou sedící kapky pomocí softwaru Krüss Advance, který je standardně dodáván k přístroji. Obecně se zařízení skládá z kamery připojené k počítači, posuvného stolku a dávkovači kapaliny. Aparatura používaná k měření je zobrazena na Obrázku 10.

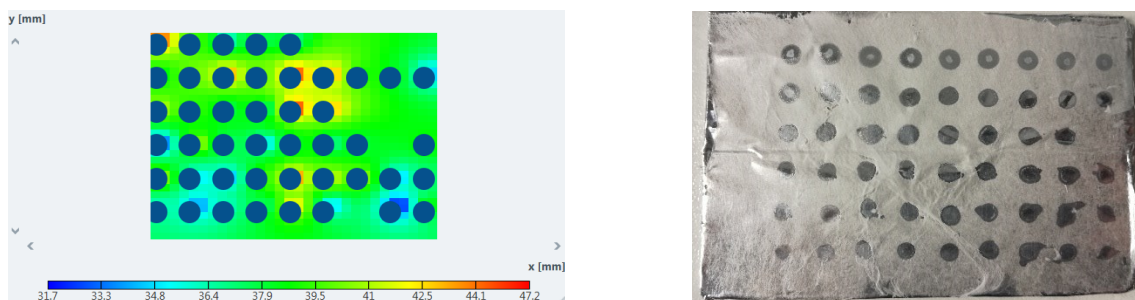


Obrázek 10 Zařízení Krüss



Obrázek 11 Ukázka kapky nanesené na vzorku

Samotné měření probíhalo v módu Mapping, kdy po nastavení parametrů vzorku, jako je šířka, délka a počet chtěných kapek na plochu vzorku, přístroj sám zahájil kapkování a vyhodnocení jednotlivých úhlů smáčení (Obrázek 11). Na začátku měření je nutné ještě šířku kapiláry, která dává kapalinu (v našem případě vodu) a objem jednotlivých kapek ($3\mu\text{l}$).



Obrázek 12 Srovnání výsledku měření v módu Mapping a reálného vzorku

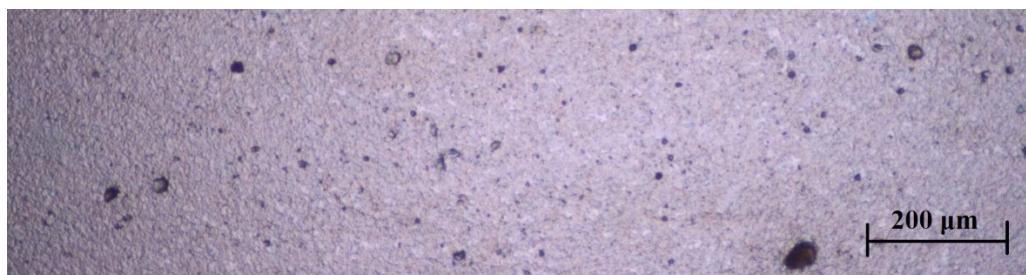
Velkou výhodou módu Mapping je možnost plně automatického měření a následného jednoduchého vyřazení hodnot, které byly naměřeny na výrazně nehomogenním místě vzorku. I přes plně automatizované měření je posléze vhodné veškerá naměřená data zkontrolovat, jelikož přístroj v několika případech změřil kapku, která ještě nebyla přisedlá na povrchu vzorku, či vysela na kapiláře. Taková hodnota pak výrazně ovlivnila průměrnou velikost kontaktního úhlu smáčení. K dalšímu ovlivnění docházelo v případě měření kontaktního úhlu smáčení u nanovláken, kdy povrch hliníkové fólie nebyl jednoduše pokryt polymerními vlákny, takže některé hodnoty spíše odpovídaly hliníkové fólii. Tento případ pak byl jasně vidět na mapě vzorku a daná hodnota mohla být jednoduše vyřazena. Na obrázku 12 je vidět porovnání reálného vzorku s výslednou mapou vzorku.

5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Naměřené výsledky byly porovnávány z několika hledisek. Z pohledu vlivu použitého rozpouštědla, z pohledu přídatku siliky, a nakonec jsou zařazeny další vlivy, jako je vliv sonikace a přídatku dispergačního činidla. V jednom případě byl zkoumán i vliv použitého napětí při elektrostatickém zvlákňování. Kontaktní úhel smáčení byl měřen na polymerních filmech a nanovlákných vrstvách. Od sebe se především liší zapracováním siliky. U polymerních filmů je silika spíše orientována jen na povrchu, naopak nanovlákná jsou jí nepravidelně obalena.

5.1 Polymerní filmy

Jelikož silika v polymerním roztoku není držena žádnou chemickou vazbou, tak u polymerních filmů nejvíce závisí na tom, jak se podařilo siliku zapracovat do roztoku a nakolik pak má tendenci se znovu oddělovat. Jak je vidět na Obrázku 13, povrch filmů se zdá být jakoby posypaný silikou. Právě její množství na povrchu pak ovlivní kontaktní úhel smáčení.



Obrázek 13 Povrch filmu 7 hm. % roztoku PEO s FS R805 ve vodě a etanolu

5.1.1 Vliv použitého rozpouštědla a koncentrace u čistých roztoků

U filmů by použité rozpouštědlo ani použitá koncentrace neměla mít významný vliv na kontaktní úhel smáčení, jelikož zde rozpouštědlo nijak nemění stavbu polymeru a po vypaření zcela vymizí. Tato teorie se během měření potvrdila, což je zřejmé v Tabulce 5, kde jsou uvedeny hodnoty kontaktních úhlů smáčení filmů připravených z čistých roztoků 7 hm. % a 9 hm. % PEO ve vodě a ve směsi etanolu a vody.

Tabulka 5 Vliv použitého rozpouštědla na smáčivost PEO filmů

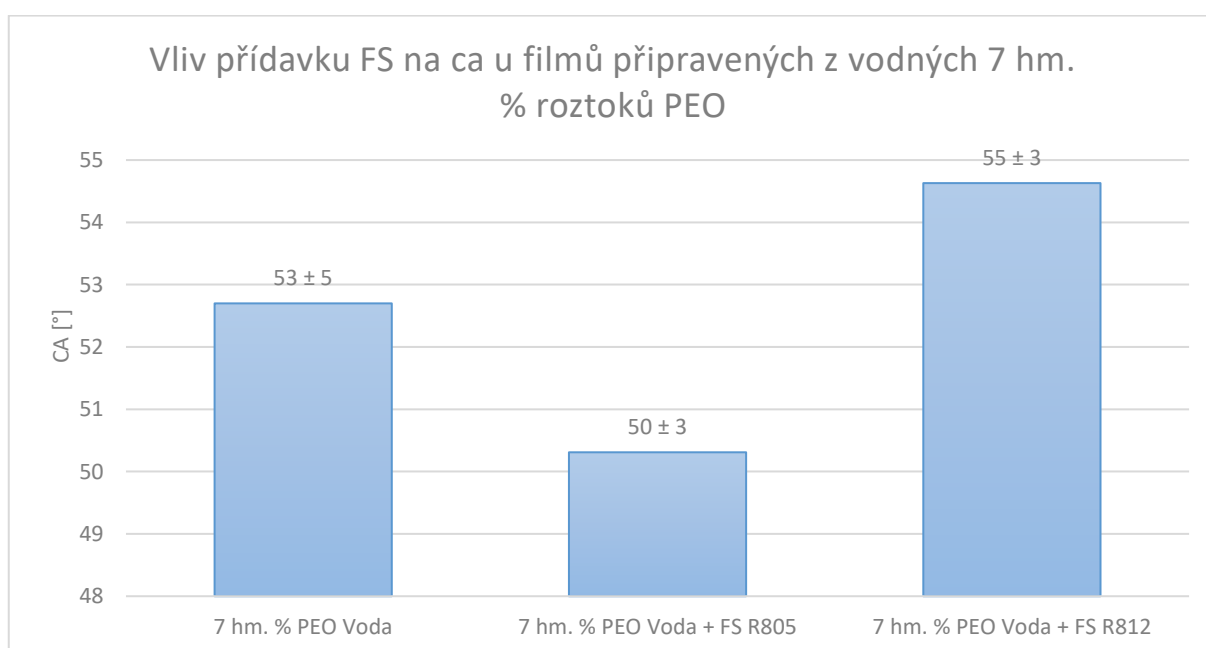
Rozpouštědlo	Voda	Etanol/Voda	Voda	Etanol/Voda
Koncentrace PEO [hm. %]	7	7	9	9
CA [°]	53 ± 5	49 ± 5	53 ± 5	54 ± 3

V případě užití vody jako rozpouštědla nemá zvolená koncentrace PEO téměř žádný vliv na kontaktní úhel smáčení. Jeho hodnota se po zaokrouhlení neliší. Pro film připravený ze 7 hm. % roztoku PEO ve vodě je CA (53 ± 5) ° a pro film 9 hm. % PEO ve vodě je CA (53 ± 5) °. Naopak u rozpouštědla etanol/voda je už rozdíl o něco znatelnější. Film připravený ze 7 hm. % PEO v etanolu/vodě má CA (49 ± 5) ° a u 9 hm. % PEO v etanolu/vodě má CA (54 ± 3) °, zde již rozdíl činí 5°, avšak jelikož nejde o nijak markantní vzrůst úhlu, nelze jednoznačně říct, zda jsou roztoky s vyšší koncentrací vhodnější. Stejný závěr platí i pro vliv samotného rozpouštědla. U 7 hm. % roztoků má vyšší hodnotu kontaktního úhlu smáčení film připravený z vodného roztoku, kdežto u 9 hm. % je lehce hydrofobnější film připravený z roztoku etanol/voda. Jelikož je zde rozdíl pouhý 1°, zdá se, že ani použité rozpouštědlo nemá na výsledný kontaktní úhel smáčení u polymerních filmů vliv.

5.1.2 Vliv přídavku siliky

Jelikož je silika silně hydrofobní a PEO naopak hydrofilní, měl by přídavek siliky snížit hydrofilitu, tedy i smáčivost polymeru.

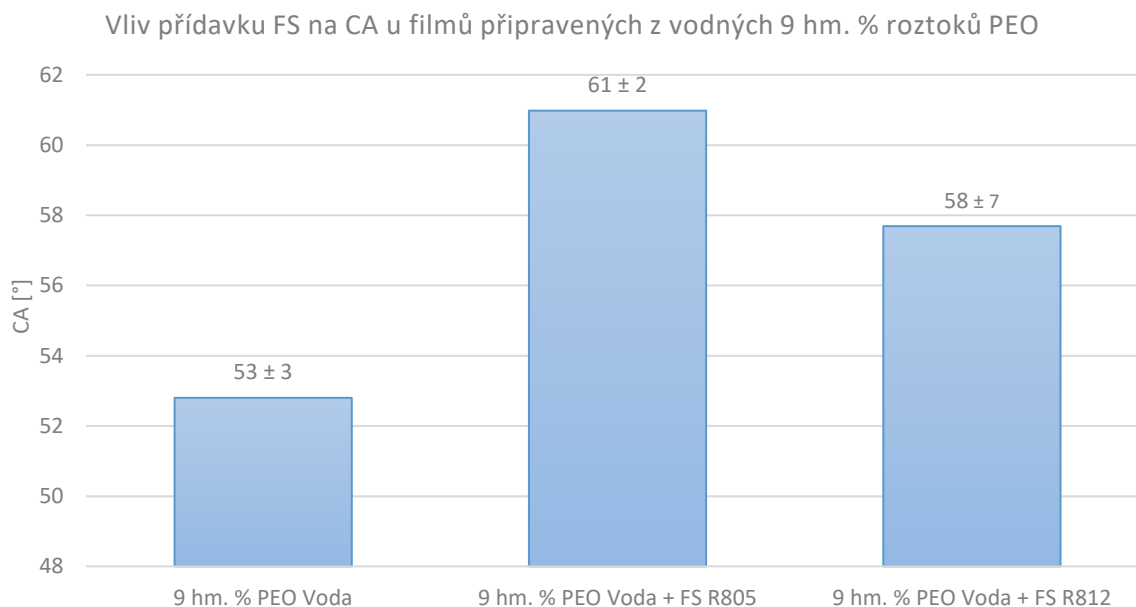
V Grafu 1 jsou zobrazeny výsledky kontaktních úhlů smáčení filmů připravených ze 7 hm. % roztoků PEO ve vodě, jak z čistých roztoků, tak i z roztoků s přídavkem obou typů silik.



Graf 1 Vliv přídavku siliky na kontaktní úhel smáčení u filmů připravených z vodných 7 hm. % roztoků PEO

Je zde možné vyčíst, že po přídavku siliky R 805 kontaktní úhel smáčení dokonce klesl. Což s ohledem na další měření ukazuje na nepřesný výsledek (obecně přídavek siliky zvyšuje CA). Ke zkreslení hodnoty nejspíše došlo nedostatečným promícháním roztoku před nanášením filmu. Reálně lze tedy porovnávat pouze vliv přídavku siliky R812. Po jejím přídavku vzrostl CA filmu na hodnotu (55 ± 3) ° oproti filmu připraveného z čistého roztoku o 2°.

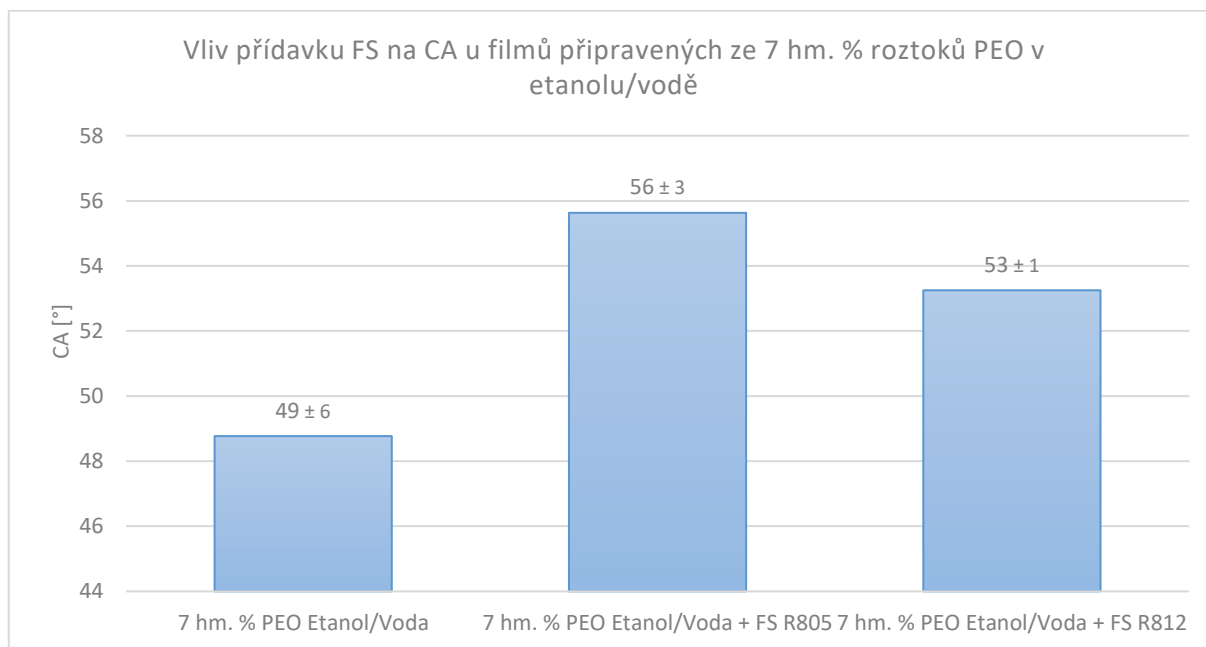
V Grafu 2 jsou zobrazeny výsledky kontaktních úhlů smáčení filmů připravených z 9 hm. % roztoků PEO ve vodě, jak z čistých roztoků, tak i z roztoků s přidavkem obou typů silik. Zde je již vliv přidavku siliky znatelnější.



Graf 2 Vliv přidavku siliky na kontaktní úhel smáčení u filmů připravených z vodných 9 hm. % roztoků PEO

Po přidání siliky R805 vzrostl CA na hodnotu $(61 \pm 2)^\circ$, přidání tohoto typu siliky způsobí výrazný nárůst CA o 8° . Film připravený z roztoku s přidavkem siliky R812 má CA $(58 \pm 7)^\circ$, vzrostl tedy o 5° . V případě filmů připravených z 9 hm. % vodných roztoků PEO dosahuje nejvyššího kontaktního úhlu smáčení směs se silikou R805.

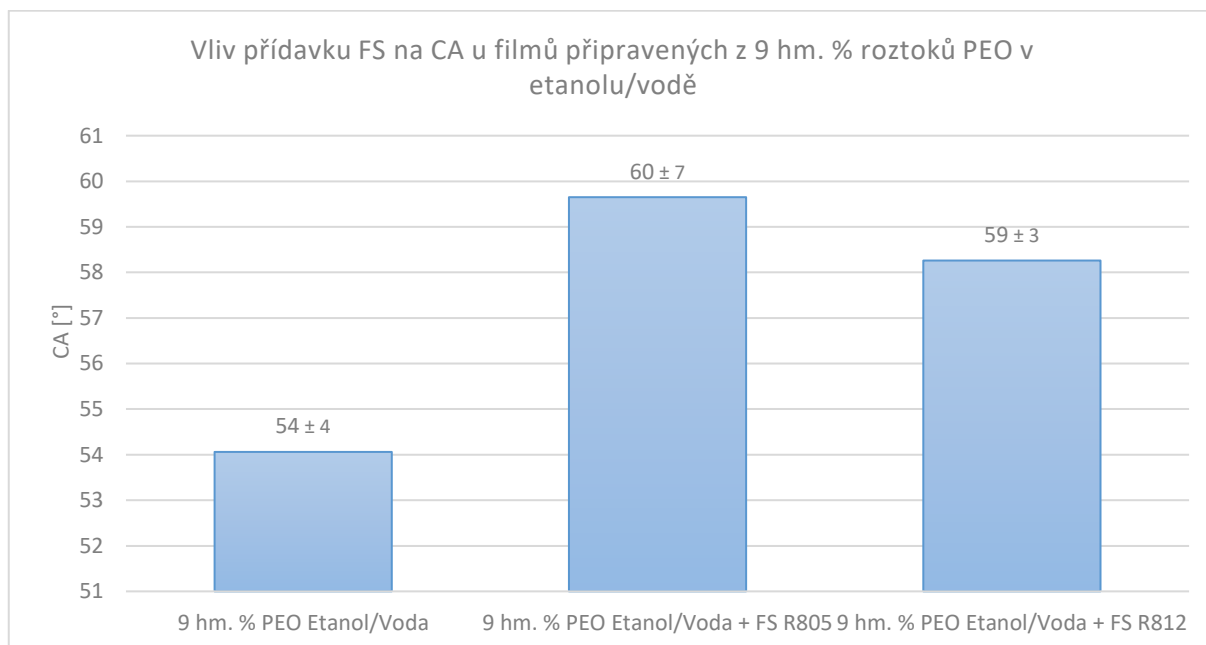
V Grafu 3 jsou zobrazeny výsledky kontaktních úhlů smáčení filmů připravených ze 7 hm. % roztoků PEO v rozpouštědle etanol/voda, jak z čistých roztoků, tak i z roztoků s přídavkem obou typů silik.



Graf 3 Vliv přídavku siliky na kontaktní úhel smáčení u filmů připravených ze 7 hm.% roztoků PEO v etanolu/vodě

Po přidání siliky R805 vzrostl CA na hodnotu ($56 \pm 3^\circ$, přidání tohoto typu siliky zapříčiní nárůst CA o 7° . Film připravený z roztoku s přídavkem siliky R812 má CA (53 ± 1) $^\circ$, vzrostl tedy o 4° . V případě filmů připravených ze 7 hm. % roztoků PEO v etanolu/vodě dosahuje nejvyššího kontaktního úhlu smáčení také směs se silikou R805.

V Grafu 4 jsou zobrazeny výsledky kontaktních úhlů smáčení filmů připravených z 9 hm. % roztoků PEO v rozpouštědle etanol/voda, jak z čistých roztoků, tak i z roztoků s přísávkem obou typů silik.



Graf 4 Vliv přísávků siliky na kontaktní úhel smáčení u filmů připravených z 9 hm. % roztoků PEO v etanolu/vodě

Po přísávkem siliky R805 vzrostl CA na hodnotu $(60 \pm 7)^\circ$, přísávkem tohoto typu siliky zapříčinil nárůst CA o 6° . Film připravený z roztoku s přísávkem siliky R812 má CA $(59 \pm 3)^\circ$, vzrostl tedy o 5° . V případě filmů připravených z 9 hm. % roztoků PEO v etanolu/vodě opět dosahuje nejvyššího kontaktního úhlu smáčení směs se silikou R805.

Tabulka 6 zobrazuje přehled všech naměřených hodnot při sledování vlivu přísávků siliky. Dvě zvýrazněné hodnoty ukazují nejvyšší hodnotu kontaktního úhlu smáčení, tedy i nejvýhodnější kombinaci použitého rozpouštědla, koncentrace roztoku, a hlavně použitého typu siliky. Nejlepších výsledků bylo dosaženo přísávkem siliky R805. Nejvyšší hodnotu CA má film připravený z 9 hm. % roztoku PEO ve vodě se silikou R805, a to $(61 \pm 2)^\circ$. Druhou nejvyšší hodnotu má film připravený z 9 hm. % roztoku PEO ve etanolu/vodě se silikou R805 $(60 \pm 7)^\circ$.

Tabulka 6 Přehled naměřených hodnot při sledování vlivu přídavku siliky u polymerních filmů

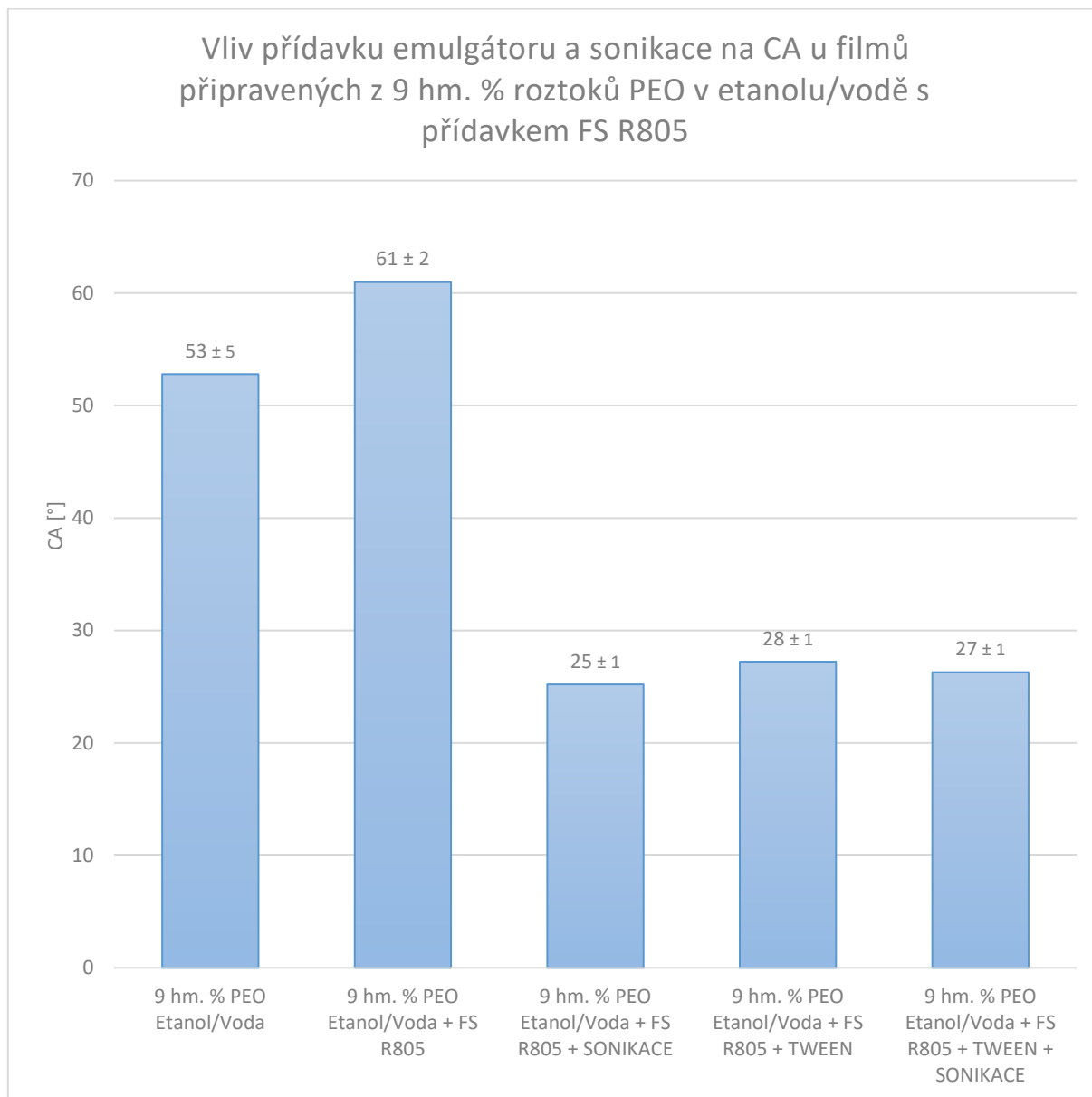
Směs	CA [°]
7 hm. % PEO Voda	53 ± 5
7 hm. % PEO Voda + FS R805	51 ± 3
7 hm. % PEO Voda + FS R812	55 ± 3
7 hm. % PEO Etanol/Voda	49 ± 6
7 hm. % PEO Etanol/Voda + FS R805	56 ± 3
7 hm. % PEO Etanol/Voda + FS R812	54 ± 1
9 hm. % PEO Voda	53 ± 3
9 hm. % PEO Voda + FS R805	61 ± 2
9 hm. % PEO Voda + FS R812	58 ± 7
9 hm. % PEO Etanol/Voda	54 ± 3
9 hm. % PEO Etanol/Voda + FS R805	60 ± 7
9 hm. % PEO Etanol/Voda + FS R812	59 ± 3

5.1.3 Další vlivy

V případě některých vzorků byl zkoumán i vliv přidání emulgátoru ke směsi, či jak velký dopad měla na zapracování siliky sonikace. Jelikož se tyto postupy z pohledu zvyšování kontaktního úhlu smáčení ukázaly jako neefektivní a dá se říci i zbytečné. Navíc při delší době sonikace hrozí zkracování polymerních řetězců, proto tedy bylo od této metody upuštěno. Proto jsou zde uvedeny jen příklady, nikoliv ucelené řady. Každý vliv je vždy porovnán s čistými polymerními roztoky a s partnerem s plnivem bez emulgátoru, či použité sonikace.

Ve všech případech došlo k výraznému poklesu hodnot CA. Po přídavku emulgátoru, sonikaci, či použité obojího získáme sice homogennější systém, ale děje se tak na úkor povrchových vlastností. Množství siliky na povrchu ubylo, jelikož je více rozptýlena v objemu.

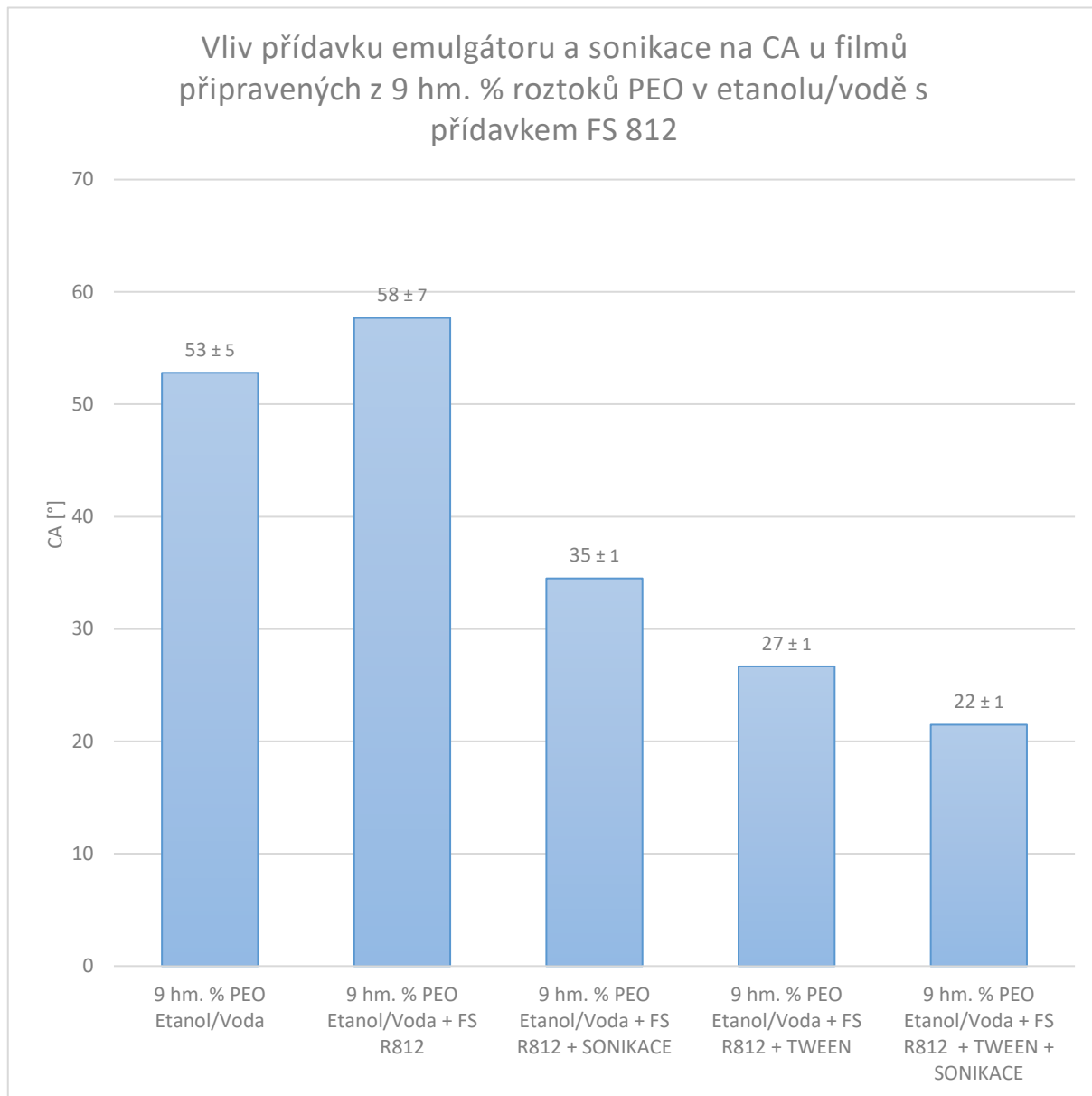
V Grafu 5 jsou zobrazeny výsledky kontaktních úhlů smáčení u filmů připravených z 9 hm. % roztoků PEO v etanolu/vodě se silikou R805, s přidavkem emulgátoru a použitím sonikace.



Graf 5 Vliv přidavku emulgátoru a sonikace na kontaktní úhel smáčení u filmů připravených z 9 hm. % roztoků PEO v etanolu/vodě s přidavkem siliky R805

Po přidání emulgátoru TWEEN k 9 hm. % roztoku PEO v etanolu/vodě se silikou R805 se CA filmu změnil na hodnotu $(28 \pm 1)^\circ$, klesl tedy o celých 33° . Sonikací 9 hm. % roztoku PEO v etanolu/vodě se silikou R805 klesl o 36° na hodnotu $(25 \pm 1)^\circ$. Při použití obou těchto vlivů, emulgátoru a sonikace, je výsledný CA na hodnotě $(27 \pm 1)^\circ$.

V Grafu 6 jsou zobrazeny výsledky kontaktních úhlů smáčení u filmů připravených z 9 hm. % roztoků PEO v etanolu/vodě se silikou R812, s přidavkem emulgátoru a použitím sonikace.



Graf 6 Vliv přidavku emulgátoru a sonikace na kontaktní úhel smáčení u filmů připravených z 9 hm. % roztoků PEO v etanolu/vodě s přidavkem siliky R812

Po přidání emulgátoru TWEEN k 9 hm. % roztoku PEO v etanolu/vodě se silikou R812 se CA filmu změnil na hodnotu $(27 \pm 1)^\circ$, klesl tedy o celých 31° . Sonikací 9 hm. % roztoku PEO v etanolu/vodě se silikou R812 klesl o 23° na hodnotu $(35 \pm 1)^\circ$. Při použití obou těchto vlivů, emulgátoru a sonikace, je výsledný CA na hodnotě $(22 \pm 1)^\circ$.

Jak lze z Tabulky 7 vyčíst, tak přidavek emulgátoru výrazně snižuje výsledný kontaktní úhel polymerních filmů. Jelikož emulgátor snižuje povrchové napětí, pomůže zpracovat siliku do objemu roztoku. Je zde však na pováženu, zda-li mimo to nesnižuje i kontaktní úhel směsi. Pokles tedy může být způsoben jak úbytkem siliky na povrchu vlivem větší homogenizace, či právě samotnou přítomností emulgátoru.

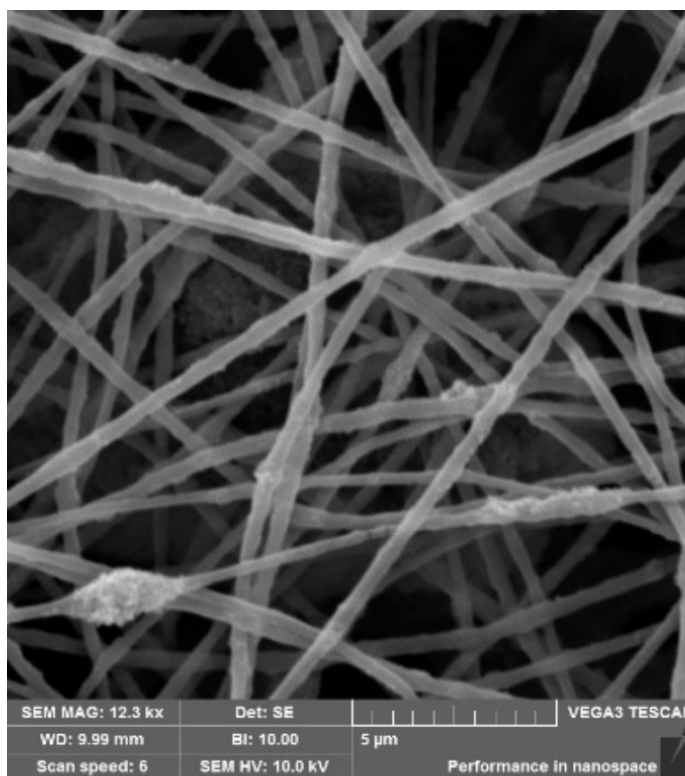
Sonikace opět napomáhá zpracovat siliku, tudíž po jejím použití mají polymerní filmy nižší kontaktní úhel smáčení.

Tabulka 7 Přehled naměřených hodnot při sledování vlivu přidavku emulgátoru a sonikace u filmů připravených z 9 hm. % roztoků PEO v etanolu/vodě s přidavkem siliky R805 nebo R812

<i>Směs</i>	<i>CA [°]</i>
<i>9 hm. % PEO Etanol/Voda</i>	<i>53± 5</i>
<i>9 hm. % PEO Etanol/Voda + FS R805</i>	<i>61± 2</i>
<i>9 hm. % PEO Etanol/Voda + FS R812</i>	<i>58± 7</i>
<i>9 hm. % PEO Etanol/Voda + FS R805 + SONIKACE</i>	<i>26± 1</i>
<i>9 hm. % PEO Etanol/Voda + FS R812 + SONIKACE</i>	<i>35 ± 1</i>
<i>9 hm. % PEO Etanol/Voda + FS R805 + TWEEN</i>	<i>28 ± 1</i>
<i>9 hm. % PEO Etanol/Voda + FS R812 + TWEEN</i>	<i>27 ± 1</i>
<i>9 hm. % PEO Etanol/Voda + FS R805 + TWEEN + SONIKACE</i>	<i>27 ± 1</i>
<i>9 hm. % PEO Etanol/Voda + FS R812 + TWEEN + SONIKACE</i>	<i>22 ± 1</i>

5.2 Polymerní nanovlákná

Nanovláknenné vrstvy nemají na rozdíl od polymerních filmů jednotlý povrch, v závislosti na použitém rozpouštědle, koncentraci, plnivech mají více, či méně jemnou strukturu, pórovitost, či tloušťku. Tudíž se kontaktní úhel smáčení liší i u nanovláken připravených z roztoků bez plniv. Jak jde vidět na Obrázku 14, nanovlákná jsou silikou nerovnoměrně obalena, což je jedna z odlišností od polymerních vrstev. Navíc zde významnou roli hraje i okolní prostředí v němž docházelo ke zvláknňování. Bohužel zde v několika případech byly připravená nanovlákná natolik jemná, či jich bylo velmi málo, takže měření jejich kontaktních úhlů smáčení nebylo možné.



Obrázek 14 Snímek ze SEM nanovláknenné vrstvy připravené z vodného 9 hm. % roztoku PEO s FS R805 a emulgátorem TWEEN

5.2.1 Vliv použitého rozpouštědla

Oproti polymerním filmům u elektrostaticky zvlákněných nanovláken hraje použité rozpouštědlo významnou roli, znatelně ovlivní kvalitu a tloušťku vláken. To jistě platí i pro koncentraci, vliv koncentrace je znázorněn v Tabulce 8

Tabulka 8 Vliv koncentrace vodných roztoků na tloušťku nanovláken

Rozpouštědlo	Voda	Voda
Koncentrace PEO [hm. %]	7	9
Průměr nanovláknů [nm]	180 ± 28	267 ± 43

Jak je z Tabulky 9 zřejmé, s vyšší koncentrací kontaktní úhel smáčení výrazně klesá. Jak vyplývá z teorie, s rostoucí koncentrací roste i tloušťka nanovláken, což způsobilo menší celistvost nanovlákněné vrstvy.¹⁵ Vlákna tedy byla již od pohledu silnější, avšak vrstva nebyla homogenní.

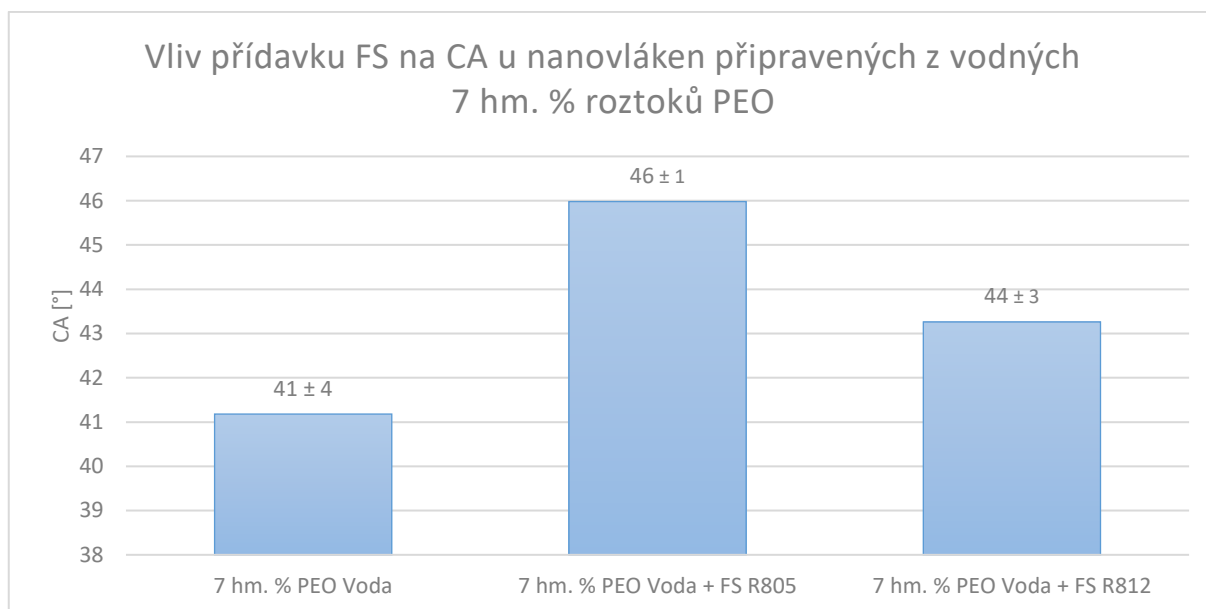
Tabulka 9 Vliv použitého rozpouštědla na smáčivost PEO nanovláken

Rozpouštědlo	Voda	Etanol/Voda	Voda	Etanol/Voda
Koncentrace PEO [hm. %]	7	7	9	9
CA [°]	41 ± 4	-	22 ± 2	36 ± 4

V případě nanovláken připravených ze 7 hm. % roztoků PEO v etanolu/vodě nebylo možné určit kontaktní úhel smáčení, neboť nanovlákněná vrstva byla neměřitelná. Dá se tedy říct, tato kombinace rozpouštědla a koncentrace je naprosto nevhodná. Naopak nanovlákněná vrstva připravená ze 7 hm. % vodných roztoků PEO dosahují nejvyšší hodnoty, a to (41±4) °, což odpovídá dokonce dvojnásobné hodnotě oproti nanovláknům připravených z vodného roztoku vyšší koncentrace.

5.2.2 Vliv přídavku siliky

V Grafu 7 jsou zobrazeny výsledky kontaktních úhlů smáčení nanovláken připravených ze 7 hm. % roztoků PEO ve vodě, jak z čistých roztoků, tak i z roztoků s přídavkem obou typů silik.

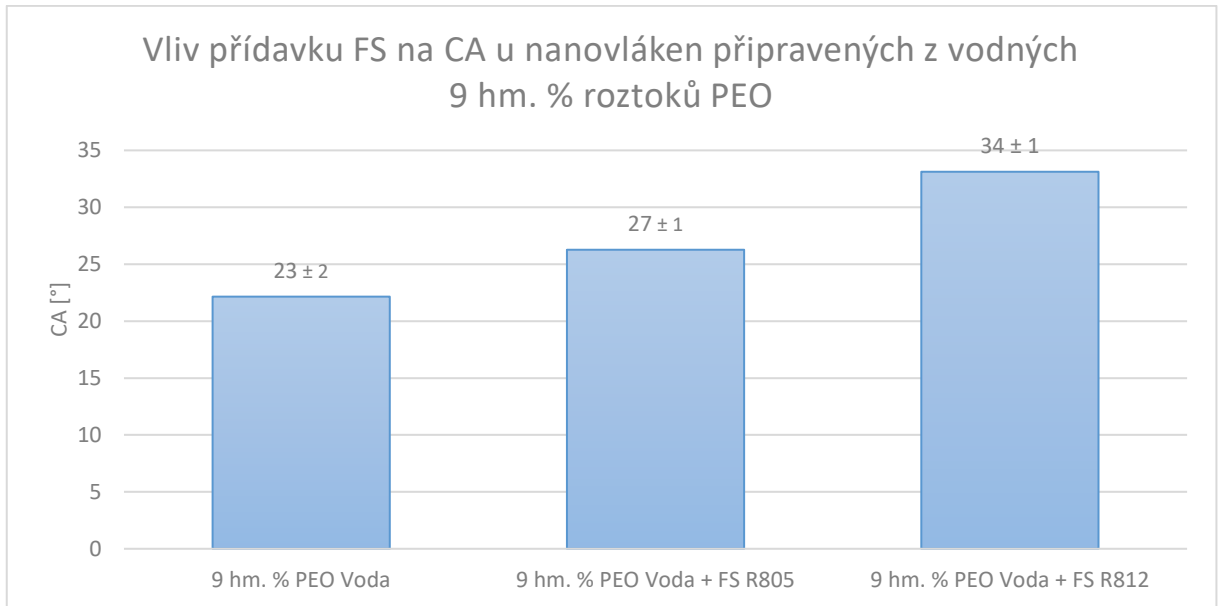


Graf 7 Vliv přídavku siliky na kontaktní úhel smáčení u nanovláken připravených z vodných 7 hm. % roztoků PEO

Po přidání siliky R805 vzrostl CA nanovláken na hodnotu $(46 \pm 1)^\circ$, přidání tohoto typu siliky zapříčiní nárůst CA o 5° .

Nanovlákná připravená z roztoku s přídavkem siliky R812 mají CA $(44 \pm 3)^\circ$, vzrostl tedy o 3° . V případě nanovláken připravených z 7 hm. % vodných roztoků PEO dosahuje nejvyššího kontaktního úhlu smáčení směs se silikou R805.

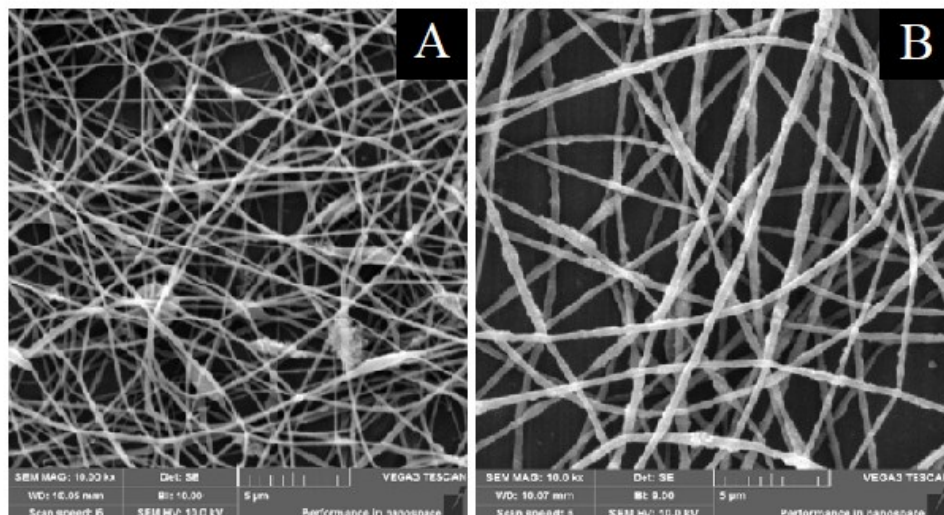
V Grafu 8 jsou zobrazeny výsledky kontaktních úhlů smáčení nanovláken připravených z 9 hm. % roztoků PEO ve vodě, jak z čistých roztoků, tak i z roztoků s přídavkem obou typů silik.



Graf 8 Vliv přídavku siliky na kontaktní úhel smáčení u nanovláken připravených z vodných 9 hm. % roztoků PEO

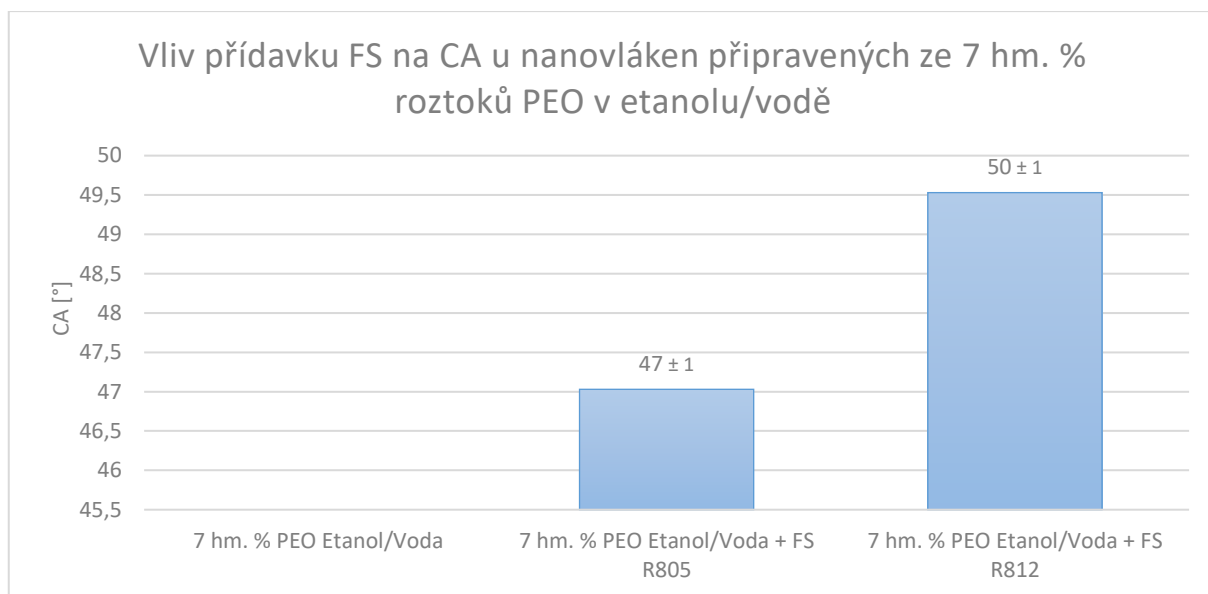
Po přidání siliky R805 vzrostl CA nanovláken na hodnotu $(27 \pm 1)^\circ$, přidání tohoto typu siliky zapříčiní nárůst CA pouze o 4° . Nanovlákná připravená z roztoku s přídavkem siliky R812 mají CA $(34 \pm 1)^\circ$, vzrostl tedy o 9° . V případě nanovláken připravených z 9 hm. % vodných roztoků PEO dosahuje nejvyššího kontaktního úhlu smáčení směs se silikou R812.

Jak je vidět na Obrázku 15 zde má vliv koncentrace na tloušťku nanovláken.



Obrázek 15 Snímky ze SEM u nanovláken připravených z (A) 7 hm. % roztoku PEO ve vodě se silikou R805, (B) 9 hm. % roztoku PEO ve vodě se silikou R805

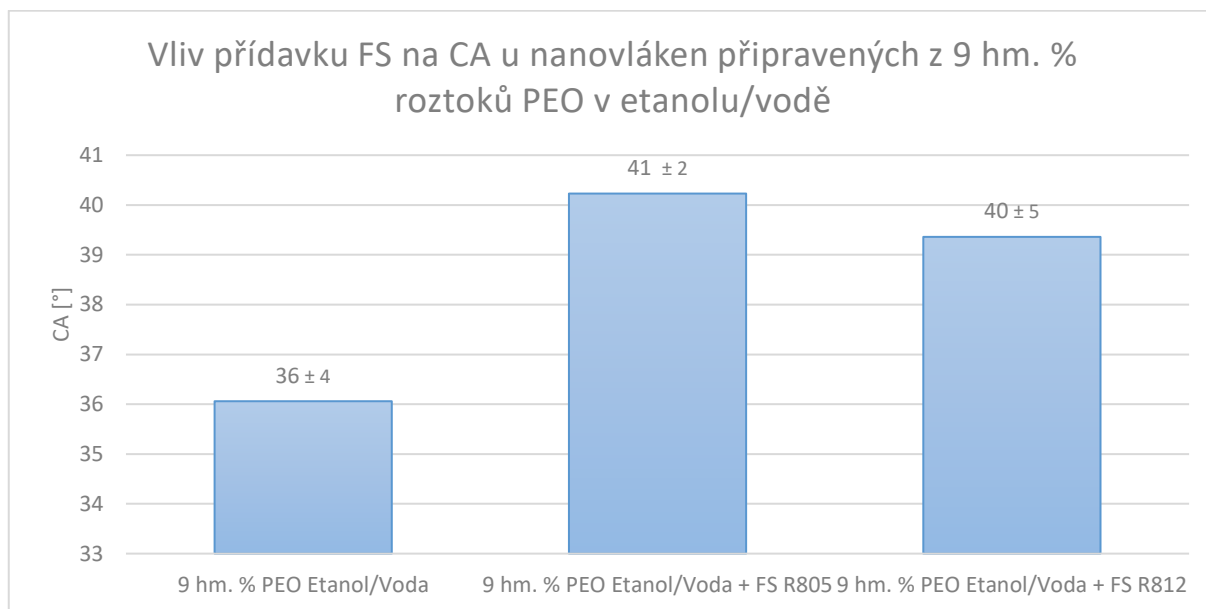
V Grafu 9 jsou zobrazeny výsledky kontaktních úhlů smáčení nanovláken připravených ze 7 hm. % roztoků PEO v rozpouštědle etanol/voda s použitím obou typů silik. Bohužel zde není uvedena hodnota CA nanovláken z čistého polymerního roztoku, jelikož jejich vrstva byla neměřitelná. Jak již bylo zmíněno, mimo rozpouštědlo a koncentraci hrají výraznou roli při elektrostatičké zvlákňování i okolní podmínky v laboratoři. Což mohlo mít vliv na stav nanovláken, která byla velmi jemná.



Graf 9 Vliv přídavku siliky na kontaktní úhel smáčení u nanovláken připravených ze 7 hm. % roztoků PEO v etanolu/vodě

Nanovlákná připravená z roztoků s přídavkem siliky R805 mají hodnotu CA (47 ± 1) °. Nanovlákná připravená z roztoku s přídavkem siliky R812 mají CA (50 ± 1) °. V případě nanovláken připravených ze 7 hm. % roztoků PEO v etanolu/vodě dosahuje nejvyššího kontaktního úhlu smáčení také směs se silikou R812.

V Grafu 10 jsou zobrazeny výsledky kontaktních úhlů smáčení nanovláken připravených z 9 hm. % roztoků PEO v rozpouštědle etanol/voda, jak z čistých roztoků, tak i z roztoků s přidavkem obou typů silik.



Graf 10 Vliv přidavku siliky na kontaktní úhel smáčení u nanovláken připravených z 9 hm. % roztoků PEO v etanolu/vodě

Po přidání siliky R805 vzrostl CA na hodnotu ($41 \pm 2^\circ$, přidání tohoto typu siliky zapříčiní nárůst CA o 5° . Nanovlákná připravená z roztoku s přidavkem siliky R812 mají CA ($40 \pm 5^\circ$), vzrostl tedy o 4° . V případě nanovláken připravených z 9 hm. % roztoků PEO v etanolu/vodě dosahuje nejvyššího kontaktního úhlu smáčení také směs se silikou R805.

Tabulka 10 zobrazuje přehled všech naměřených hodnot při sledování vlivu přídavku siliky u nanovlákných vrstev. Zde není možné jednotně říct, která silika je lepší.

V případě nanovláken z vodných roztoků mají nejvyšší kontaktní úhel smáčení nanovlákná připravená ze 7 hm. % roztoků PEO ve vodě s přídavkem siliky R805. Kdežto u nanovláken z etanolu/vody má nejvyšší hodnotu CA 7 hm. % PEO v etanolu/vodě se silikou R812. Dvě zvýrazněné hodnoty ukazují nejvyšší hodnotu kontaktního úhlu smáčení, tedy i nejvýhodnější kombinaci použitého rozpouštědla, koncentrace roztoku, a hlavně použitého typu siliky.

Nejvyšší hodnotu CA mají nanovlákná připravená ze 7 hm. % PEO v etanolu/vodě se silikou R812, a to $(50 \pm 1)^\circ$. Druhou nejvyšší hodnotu mají nanovlákná připravená ze 7 hm. % PEO v etanolu/vodě se silikou R805 $(47 \pm 1)^\circ$.

Tabulka 10 Přehled naměřených hodnot při sledování vlivu přídavku siliky u nanovláken

Směs	CA [$^\circ$]
7 hm. % PEO Voda	41 \pm 4
7 hm. % PEO Voda + FS R805	46 \pm 1
7 hm. % PEO Voda + FS R812	44 \pm 3
7 hm. % PEO Etanol/Voda	-
7 hm. % PEO Etanol/Voda + FS R805	47 \pm 1
7 hm. % PEO Etanol/Voda + FS R812	50 \pm 1
9 hm. % PEO Voda	23 \pm 2
9 hm. % PEO Voda + FS R805	27 \pm 1
9 hm. % PEO Voda + FS R812	34 \pm 1
9 hm. % PEO Etanol/Voda	36 \pm 4
9 hm. % PEO Etanol/Voda + FS R805	41 \pm 2
9 hm. % PEO Etanol/Voda + FS R812	40 \pm 5

5.2.3 Další vlivy

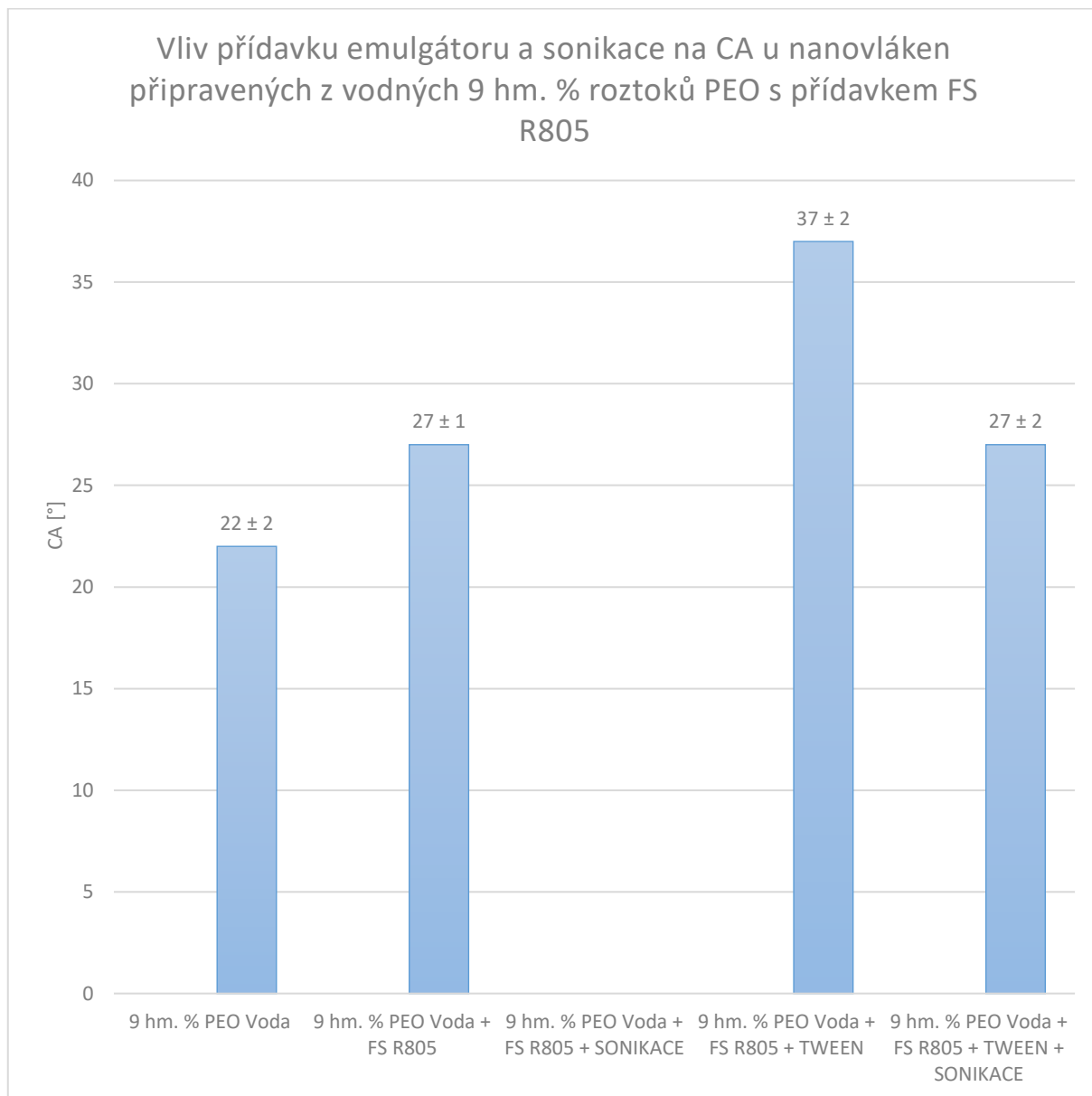
Jelikož použitým napětím při elektrostatickém zvlákňování můžeme ovlivňovat tloušťku nanovláken, přičemž se zvyšujícím se napětím tloušťka klesá, je možné, že tento faktor bude mít vliv i na kontaktní úhel smáčení.¹³ V úvahu totiž připadá fakt, že na tenčí vlákno nasedne méně siliky a nebude tolik obalené, tudíž jeho smáčivost nebude tolik ovlivněna. Napětí se měnilo při elektrostatickém zvlákňování 7 hm. % roztoků poly(etylen oxidu) v rozpouštědle voda/etanol se silikou R 805. Přesto, že by tento parametr mohl ovlivnit kontaktní úhel smáčení je z Tabulky 11 zřejmé, že změny jsou minimální a nedochází k žádné závislosti mezi kontaktním úhlem smáčení a použitým napětím. V případě 20 kV a 25 kV jsou hodnoty stejné a pro 30 kV úhel mírně klesá.

Tabulka 11 Vliv použitého napětí na výsledný kontaktní úhel smáčení

<i>7 hm. % PEO Voda/Etanol + FS R805</i>			
<i>U [kV]</i>	<i>20</i>	<i>25</i>	<i>30</i>
<i>CA [°]</i>	<i>50 ± 1</i>	<i>50 ± 1</i>	<i>48 ± 1</i>

Dalším zkoumaným vlivem je pak přídavek emulgátoru do polymerního roztoku, či jeho sonikace. Oba vlivy napomáhají zhomogenizovat siliku v roztoku. I u výsledných nanovláken by tedy měla být více zapracována v jejich objemu. Oproti filmům by zde ale tyto vlivy měly pomoci rovnoměrněji rozmístit siliku po povrchu nanovláken.

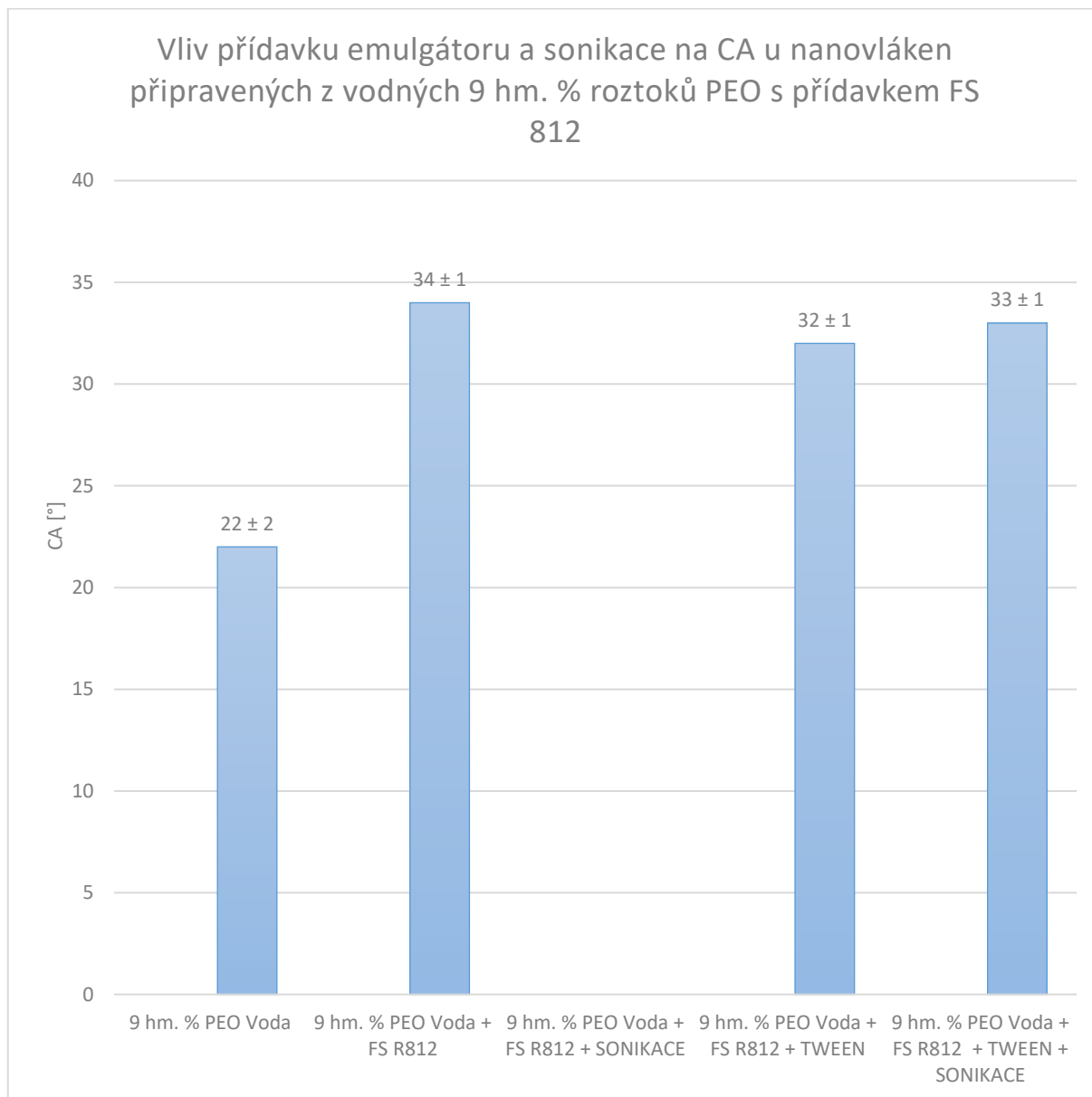
V Grafu 11 jsou zobrazeny výsledky kontaktních úhlů smáčení u nanovláken připravených z vodných 9 hm. % roztoků PEO se silikou R805, s přidavkem emulgátoru a použitím sonikace.



Graf 11 Vliv přidavku emulgátoru a sonikace na kontaktní úhel smáčení u nanovláken připravených z vodných 9 hm. % roztoků PEO s přidavkem siliky R805

Po přidání emulgátoru TWEEN k vodným 9 hm. % roztoku PEO se silikou R805 se CA nanovláken změnil na hodnotu $(37 \pm 2)^\circ$, vzrostl o 10° . Novlákná připravená ze sonikovaného, vodného 9 hm. % roztoku PEO se silikou R805 byla neměřitelná. Při použití obou těchto vlivů, emulgátoru a sonikace, je výsledný CA na hodnotě $(27 \pm 2)^\circ$.

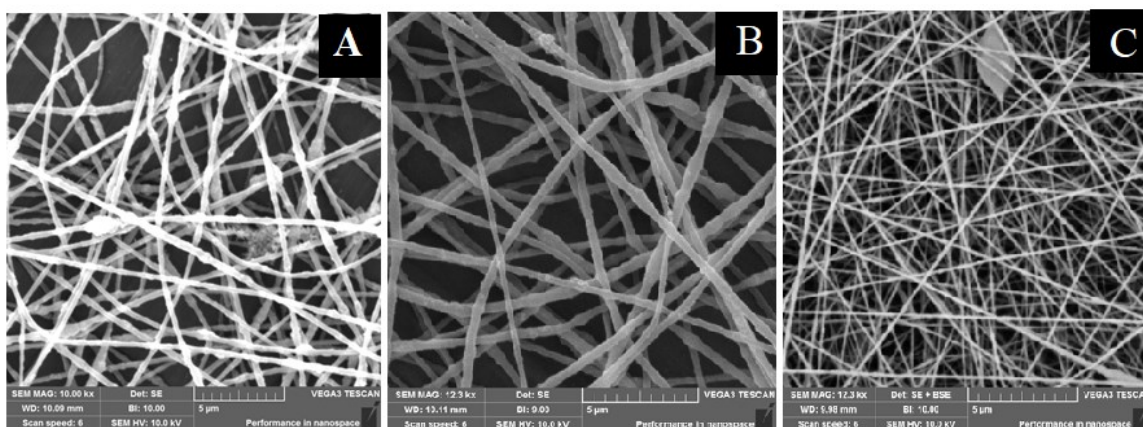
V Grafu 12 jsou zobrazeny výsledky kontaktních úhlů smáčení u nanovláken připravených z vodných 9 hm. % roztoků PEO se silikou R812, s přidavkem emulgátoru a použitím sonikace.



Graf 12 Vliv přidavku emulgátoru a sonikace na kontaktní úhel smáčení u nanovláken připravených z vodných 9 hm. % roztoků PEO s přidavkem siliky R812

Po přidání emulgátoru TWEEN vodným 9 hm. % roztoku PEO se silikou R812 se CA filmu změnil na hodnotu $(32 \pm 1)^\circ$, klesl o 2° . Novlákná připravená ze sonikovaného, vodného 9 hm. % roztoku PEO se silikou R812 byla opět neměřitelná. Při použití obou těchto vlivů, emulgátoru a sonikace, je výsledný CA na hodnotě $(23 \pm 1)^\circ$.

Na Obrázku 16 jsou pak tyto vlivy znázorněny. Jasně lze vidět, že se mění i tloušťka vláken a množství siliky na jejich povrchu.



Obrázek 16 Snímek ze SEM nanovláken připravených z (A) 9 hm. % roztoku PEO ve vodě se silikou R812, (B) 9 hm. % roztoků PEO ve vodě se silikou R812 a emulgátorem TWEEN, (C) sonikovaných 9 hm. % roztoků PEO ve vodě se silikou R812 a emulgátorem TWEEN

Jak lze vyčíst z Tabulky 12, zde již přidavek emulgátoru a sonikace nemá natolik výrazný vliv jako u polymerních filmů. Přidání do emulgátoru do 9 hm. % roztoku PEO ve vodě se silikou R805 dokonce napomohl k nárůstu výsledného kontaktního úhlu smáčení nanovláken. Nanovlákná na povrch nepojmou takové množství siliky jako polymerní filmy, tudíž i přes větší zapracování siliky do objemu není její úbytek na povrchu tak výrazný.

Tabulka 12 Přehled naměřených hodnot při sledování vlivu přidavku emulgátoru a sonikace u nanovláken připravených z vodných 9 hm. % roztoků PEO s přidavkem siliky R805 nebo R812

Směs	CA [°]
9 hm. % PEO Voda	22 ± 2
9 hm. % PEO Voda + FS R805	27 ± 1
9 hm. % PEO Voda + FS R812	34 ± 1
9 hm. % PEO Voda + FS R805 + SONIKACE	-
9 hm. % PEO Voda + FS R812 + SONIKACE	-
9 hm. % PEO Voda + FS R805 + TWEEN	37 ± 2
9 hm. % PEO Voda + FS R812 + TWEEN	32 ± 1
9 hm. % PEO Voda + FS R805 + TWEEN + SONIKACE	27 ± 2
9 hm. % PEO Voda + FS R812 + TWEEN + SONIKACE	33 ± 1

6 ZÁVĚR

Z provedených měření vyplývá, že ačkoliv má silika vliv na výsledný kontaktní úhel smáčení, není jeho zvětšení natolik výrazné jako bylo očekávané. Výsledné polymerní filmy i nanovlákná se staly méně hydrofilní, avšak žádná z kombinací nedosahuje požadovaní hranice 90° , aby se o nich mohlo mluvit jako o hydrofobních.

U polymerních filmů bez plniva nemá použité rozpouštědlo ani koncentrace vliv na výsledný kontaktní úhel smáčení. Z pohledu vlivu přídavku siliky je zde nejvýhodnější použít siliku R805, ta ve všech případech dosahovala nejvyšších hodnot CA. Nejlepšího výsledku bylo dosaženo u vodného 9 hm. % roztoku PEO se silikou R805, hodnota kontaktního úhlu smáčení filmu připraveného z tohoto roztoku je $(61 \pm 2)^\circ$. Přidání emulgátoru, či využití sonikace pro homogenizaci roztoku se ukázalo jako nevhodné. Došlo k většímu zapracování siliky do objemu na úkor výsledného kontaktního úhlu smáčení.

V případě polymerních nanovláken se jako nejlepší rozpouštědlo jeví vodný roztok o koncentraci 7 hm. % PEO. Nanovlákná připravená z tohoto roztoku mají CA $(41 \pm 4)^\circ$. Oproti filmům u nanovláken není jednoznačně jasné, která silika je nejvhodnější. Přesto ale bylo nejvyšší hodnoty CA dosaženo u nanovláken připravených ze 7 hm. % roztoků PEO v etanolu/vodě s využitím siliky R805, taková nanovlákná měla CA $(50 \pm 1)^\circ$. Použití sonikace k homogenizaci roztoku nemá na výsledný CA nanovláken značný vliv, avšak přídavek emulgátoru dokonce napomohl ke zvýšení CA. U nanovláken byla navíc možnost sledovat vliv použitého napětí při zvlákňování, ukázalo se, že s vyšším napětím CA mírně klesá.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. Thomas S., Visakh P. M.; *Handbook of Engineering and Speciality Thermoplastics: Volume 3: Polyethers and Polyesters*. **2**, (2011).
2. Kadajji V. G., Betageri G. V.; Water soluble polymers for pharmaceutical applications. *Polymers (Basel)*. **3**, 1972–2009 (2011).
3. Rane M., Parmar J., Tiwari S., Rajabi-Siahboomi A.; Application of Polyethylene Oxide in Hydrophilic Matrix Tablets. *Pharma Times* **45**, 41–48 (2013).
4. Agnew N.; *Conservation of Ancient Sites on the Silk Road: Proceeding of an International Conference on the Conservation of Grotto Sites*. (Getty Publication, 1997).
5. Yamaguchi Y. *et al.*; Polyethylene Oxide (PEO) and Polyethylene glycol (PEG) Polymer Sieving Matrix for RNA Capillary Electrophoresis. *PLoS One* **10**, (2015).
6. Toskas G. *et al.*; Chitosan(PEO)/silica Hybrid Nanofibers as a Potential Biomaterial for Bone Regeneration. *Carbohydr. Polym.* **94**, 713–722 (2013).
7. Janković B., Pelipenko J., Škarabot M., Mušević I., Kristl J.; The Design Trend in Tissue-engineering Scaffolds Based on Nanomechanical Properties of Individual Electrospun Nanofibers. *Int. J. Pharm.* **455**, 338–347 (2013).
8. Agyemang F. O., Li F., Momade F. W. Y., Kim H.; Effect of Poly(ethylene oxide) and Water on Electrospun Poly(vinylidene fluoride) Nanofibers with Enhanced Mechanical Properties as Pre-filter for Oil-in-water Filtration. *Mater. Chem. Phys.* **182**, 208–218 (2016).
9. Ahire J. J., Robertson D. D., van Reenen A. J., Dicks L. M. T.; Polyethylene Oxide (PEO)-hyaluronic Acid (HA) Nanofibers with Kanamycin Inhibits the Growth of *Listeria Monocytogenes*. *Biomed. Pharmacother.* **86**, 143–148 (2017).
10. Wypych G.; *Handbook of Fillers. Additives for Polymers 2009*, (ChemTec Publishing, 2009).
11. Bréchet Y. *et al.*; Polymer Based Nanocomposites: Effect of Filler-filler and Filler-Matrix Interactions. *Adv. Eng. Mater.* **3**, 571–577 (2001).
12. Kashiwagi T. *et al.*; Flame Retardant Mechanism of Silica Gel/silica. *Fire Mater.* **24**, 277–289 (2000).

13. Bhardwaj N., Kundu S. C.; Electrospinning: A Fascinating Fiber Fabrication Technique. *Biotechnol. Adv.* **28**, 325–347 (2010).
14. Schneider H. E.; Polyethylene Oxide Nanofiber Production by Electrospinning. **70**, (2016).
15. Kongkhlang T., Tashiro K., Kotaki M., Chirachanchai S.; Electrospinning as a New Technique to Control the Crystal Morphology and Molecular Orientation of Polyoxymethylene Nanofibers. *J. Am. Chem. Soc.* **130**, 15460–15466 (2008).
16. Baji A., Mai Y. W., Wong S. C., Abtahi M., Chen, P.; Electrospinning of Polymer Nanofibers: Effects on Oriented Morphology, Structures and Tensile Properties. *Compos. Sci. Technol.* **70**, 703–718 (2010).
17. Bartovská L., Šišková M.; *Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav*. (Vydavatelství VŠCHT, 2005).
18. Israelachvili J.; *Intermolecular and Surface Forces. Intermolecular and Surface Forces* (2011). doi:10.1016/C2009-0-21560-1
19. Mechlová, E.; *Molekulová fyzika I*. (Editační středisko CIT OU, 2004).
20. Zha, J. *et al.*; Superhydrophobicity of Polymer Films via Fluorine Atoms Covalent Attachment and Surface Nano-texturing. *J. Fluor. Chem.* **200**, 123–132 (2017).
21. Chowdhury M., Stylios G. K.; Analysis of the Effect of Experimental Parameters on the Morphology of Electrospun Polyethylene Oxide Nanofibres and on Their Thermal Properties. *J. Text. Inst.* **103**, 124–138 (2012).
22. Peer P., Filip P., Polaskova M., Kucharczyk P., Pavlinek V.; The Influence of Sonication of Poly(ethylene oxide) Solutions to the Quality of Resulting Electrospun Nanofibrous Mats. *Polym. Degrad. Stab.* **126**, 101–106 (2016).
23. Bartovská L., Šišková M.: *Co je co v povrchové a koloidní chemii*. VŠCHT Praha [Online]. [Cit. 9.4.2018]. Dostupný z WWW: <http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/ebook.help.htm>
24. Thieliicke W.: *Computergrafiken des Lotus-effekts®*. [Online]. [Cit. 9.4.2018]. Dostupný z WWW: <<http://wthieliicke.gmxhome.de/bionik/index.htm>>
25. *Hielscher - ultrazvukové technologie: WWW stránky firmy* [Online]. [Cit. 9.4.2018]. Dostupný z WWW: <https://www.hielscher.com/cs/s250l_vial_sonication_01.htm>

26. *The Dow Chemical Company: WWW stránky firmy* [Online]. [Cit. 22.4.2018].
Dostupný z WWW:< https://www.dow.com/dowwolff/en/industrial_solutions/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PEO Poly(etylen oxid)

PEG Polyetylen glykol

FS Fumed silica.

CA Kontaktní úhel

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1	Strukturní vzorec poly(etylen oxidu)	11
Obrázek 2	Sférolity polyetylen oxidu v polarizačním mikroskopu s kompenzátorem	11
Obrázek 3	Schéma aparatury na elektrostatické zvlákňování z roztoku ¹⁴	16
Obrázek 4	Vznik Taylorova kužele vlivem Maxwellova napětí z kapky na konci kapiláry ¹⁶	17
Obrázek 5	Silová rovnováha na rozhraní tří fází	18
Obrázek 6	Měření úhlu smáčení na nakloněné desce ²³	20
Obrázek 7	Přisedlá kapka (a) a přilínající bublina (b) ²³	21
Obrázek 8	Ukázka superhydrofobicity – Lotosový efekt ²⁴	22
Obrázek 9	Příprava polymerního filmu pomocí spirálového pravítka	25
Obrázek 10	Zařízení Krüss	27
Obrázek 11	Ukázka kapky nanosené na vzorku	27
Obrázek 12	Srovnání výsledku měření v módu Mapping a reálného vzorku.....	28
Obrázek 13	Povrch filmu 7 hm. % roztoku PEO s FS R805 ve vodě a etanolu.....	29
Obrázek 14	Snímek ze SEM nanovlákněné vrstvy připravené z vodního 9 hm. % roztoku PEO s FS R805 a emulgátorem TWEEN.....	39
Obrázek 15	Snímky ze SEM u nanovláken připravených z (A) 7 hm. % roztoku PEO ve vodě se silikou R805, (B) 9 hm. % roztoku PEO ve vodě se silikou R805..	42
Obrázek 16	Snímek ze SEM nanovláken připravených z (A) 9 hm. % roztoku PEO ve vodě se silikou R812, (B) 9 hm. % roztoků PEO ve vodě se silikou R812 a emulgátorem TWEEN, (C) sonikovaných 9 hm. % roztoků PEO ve vodě se silikou R812 a emulgátorem TWEEN.....	49

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Rozpustnost poly(etylen oxidu) v ukázce rozpouštědel	13
Tabulka 2 Závislost molární hmotnosti na viskozitě a teplotě tání pro PEO ve vodě ²⁵	14
Tabulka 3 Receptura pro přípravu roztoků	24
Tabulka 4 Parametry sonikace	25
Tabulka 5 Vliv použitého rozpouštědla na smáčivost PEO filmů	30
Tabulka 6 Přehled naměřených hodnot při sledování vlivu přídavku siliky u polymerních filmů	35
Tabulka 7 Přehled naměřených hodnot při sledování vlivu přídavku emulgátoru a sonikace u filmů připravených z 9 hm. % roztoků PEO v etanolu/vodě s přídavkem siliky R805 nebo R812	38
Tabulka 8 Vliv koncentrace vodných roztoků na tloušťku nanovláken	40
Tabulka 9 Vliv použitého rozpouštědla na smáčivost PEO nanovláken	40
Tabulka 10 Přehled naměřených hodnot při sledování vlivu přídavku siliky u nanovláken.....	45
Tabulka 11 Vliv použitého napětí na výsledný kontaktní úhel smáčení	46
Tabulka 12 Přehled naměřených hodnot při sledování vlivu přídavku emulgátoru a sonikace u nanovláken připravených z vodných 9 hm. % roztoků PEO s přídavkem siliky R805 nebo R812	49

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Vliv přídavku siliky na kontaktní úhel smáčení u filmů připravených z vodných 7 hm. % roztoků PEO	31
Graf 2 Vliv přídavku siliky na kontaktní úhel smáčení u filmů připravených z vodných 9 hm. % roztoků PEO	32
Graf 3 Vliv přídavku siliky na kontaktní úhel smáčení u filmů připravených ze 7 hm.% roztoků PEO v etanolu/vodě.....	33
Graf 4 Vliv přídavku siliky na kontaktní úhel smáčení u filmů připravených z 9 hm.% roztoků PEO v etanolu/vodě.....	34
Graf 5 Vliv přídavku emulgátoru a sonikace na kontaktní úhel smáčení u filmů připravených z 9 hm. % roztoků PEO v etanolu/vodě s přídavkem siliky R805	36
Graf 6 Vliv přídavku emulgátoru a sonikace na kontaktní úhel smáčení u filmů připravených z 9 hm. % roztoků PEO v etanolu/vodě s přídavkem siliky R812	37
Graf 7 Vliv přídavku siliky na kontaktní úhel smáčení u nanovláken připravených z vodných 7 hm. % roztoků PEO	41
Graf 8 Vliv přídavku siliky na kontaktní úhel smáčení u nanovláken připravených z vodných 9 hm. % roztoků PEO	42
Graf 9 Vliv přídavku siliky na kontaktní úhel smáčení u nanovláken připravených ze 7 hm. % roztoků PEO v etanolu/vodě	43
Graf 10 Vliv přídavku siliky na kontaktní úhel smáčení u nanovláken připravených z 9 hm. % roztoků PEO v etanolu/vodě	44
Graf 11 Vliv přídavku emulgátoru a sonikace na kontaktní úhel smáčení u nanovláken připravených z vodných 9 hm. % roztoků PEO s přídavkem siliky R805	47
Graf 12 Vliv přídavku emulgátoru a sonikace na kontaktní úhel smáčení u nanovláken připravených z vodných 9 hm. % roztoků PEO s přídavkem siliky R812	48

SEZNAM PŘÍLOH

1. CD ROM – bakalářská práce ve formátu pdf