



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta textilní



# Studium smáčení a vzlínání kapalin do vlákenných struktur

## Bakalářská práce

*Studijní program:* B3107 – Textil  
*Studijní obor:* 3106R016 – Textilní technologie, materiály a nanomateriály  
*Autor práce:* **Miriám Hrušková**  
*Vedoucí práce:* Ing. Jiří Chaloupek, Ph.D.

Liberec 2016

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Miriam Hrušková**  
Osobní číslo: **T13000351**  
Studijní program: **B3107 Textil**  
Studijní obor: **Textilní technologie, materiály a nanomateriály**  
Název tématu: **Studium smáčení a vzlínání kapalin do vlákněných struktur**  
Zadávající katedra: **Katedra netkaných textilií a nanovlákněných materiálů**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s problematikou vzlínání a smáčení kapalin do vlákněných struktur. Vypracujte rešerši na dané téma.
2. Navrhněte experimenty zabývající se problematikou vzlínání a smáčení textilních struktur kapalinami. Zaměřte se především na nanovlákněné struktury.
3. Vypracujte metodiku experimentu a jeho hodnocení.
4. Vyroberte sérii nanovlákněných materiálů a otestujte na nich vzlínání a smáčení kapalin. Experimenty vyhodnoťte.
5. Diskutujte výsledky a navrhněte další postupy řešení daného problému.



Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

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

Seznam odborné literatury:

1. RUSSELL, Edited by S.J. Handbook of nonwovens. Boca Raton, Fla. [etc.] : Cambridge: CRC press ; Woodhead, 2007. ISBN 978-185-5736-030.
2. de Genes, Brochard-Wyart, Quere: Capillarity and Wetting Phenomena, Drops, Bubbles, Pearls, Waves, Springer, New York, Berlin, ISBN 0-387-00592-7.

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Jiří Chaloupek, Ph.D.**

Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů

Datum zadání bakalářské práce: **10. března 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. ledna 2016**



Ing. Jana Drašarová, Ph.D.  
děkanka



prof. RNDr. David Lukáš, CSc.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 10. března 2015

## **Prohlášení**

Byla jsem seznámena s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

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

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

Bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce.

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

Datum:

Podpis:

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Chaloupkovi, Ph.D. a ostatním členům Katedry netkaných textilií za jejich hodnotné rady a pomoc při splnění této bakalářské práce.

Děkuji také své rodině a všem blízkým, kteří mi byli v době studia oporou.

## **Anotace**

Cílem této bakalářské práce je analyzovat smáčení struktur nanovláknenných vrstev, jejichž vlákna jsou orientovaná nebo náhodně uspořádaná. Nanovláknenné vrstvy byly vyrobeny jehlovým elektrostatickým zvlákňováním a jako polymer byl použit polykaprolakton.

V teoretické části práce jsou popsány základy teorie smáčení a vzlínání. Praktická část je zaměřena na metodu výroby orientovaných a neorientovaných nanovláknenných vrstev a také popisuje chování kapek nanosených na vyrobených vzorcích. Na základě tohoto zkoumání je vyhodnocen vliv struktury nanovláknenných vrstev na smáčení.

**Klíčová slova:** smáčení, vzlínání, elektrostatické zvlákňování, orientované a neorientované nanovláknenné vrstvy.

## **Annotation**

The aim of this bachelor thesis is to analyse wetting in nanofibrous structures. The mats of aligned or randomly oriented polycaprolactone fibres were produced by needle electrospinning.

In the theoretical part of this thesis the basic knowledge of wetting and capillary action is described. The practical part is focused on methods to produce electrospun surfaces of aligned and randomly oriented fibres. This part of the thesis also describes behaviour of liquid drops on the surfaces. The influence of nanofibrous structures on wetting is analyzed on the basis of testing.

**Key words:** wetting, capillary action, electrospinning, aligned and randomly oriented nanofibrous structures.

## Seznam použitých symbolů a zkratek

$g$	gravitační zrychlení
$h$	výška kapalinového sloupce
$l$	délka pohyblivého raménka
$p_1$	tlak vzniklý zakřivením $A_1B_1$
$p_2$	tlak vzniklý zakřivením $A_2B_2$
$p_k$	kapilární tlak
$r$	poloměr kapalinového sloupce
$s$	směrodatná odchylka
$t$	čas
$\bar{x}$	aritmetický průměr
$AB$	pohyblivé raménko
$A_1B_1, A_2B_2$	normálové řezy
$F$	síla působící na jednotkovou délku
$L$	celková délka nitě
LUCIA	Laboratory Universal Computer Image Analyser
M	molekula
PCL	poly ( $\epsilon$ -kaprolakton)
$R$	poloměr kruhového povrchu
$R_1, R_2$	poloměr křivosti
SEM	Scanning Electron Microscope
$V$	objem
$\beta$	úhel sevřený osou kapiláry a kolmicí k hladině
$\gamma$	povrchové napětí kapaliny
$\gamma_p$	povrchové napětí pevné látky
$\gamma_{pk}$	povrchové napětí na rozhraní pevná látka – kapalina
$\theta$	úhel smáčení
$\mu$	viskozita tekutiny
$\pi$	Ludolfovo číslo
$\rho_1, \rho_2$	hustoty kapaliny a vzduchu

# Obsah

1	Úvod.....	8
2	Teoretická část .....	9
2.1	Elektrostatické zvlákňování .....	9
2.1.1	Proces elektrostatického zvlákňování.....	9
2.1.2	Parametry elektrostatického zvlákňování .....	10
2.2	Polymer PCL a použité kapaliny.....	10
2.2.1	Polykaprolakton .....	10
2.2.2	Chloroform.....	11
2.2.3	Ethanol .....	11
2.2.4	Destilovaná voda.....	12
2.3	Základy teorie smáčení a vztlínání.....	12
2.3.1	Povrchové napětí.....	12
2.3.2	Kontaktní úhel a Youngova rovnice .....	13
2.3.3	Kohezní tlak .....	14
2.3.4	Kapilární tlak .....	15
2.3.5	Kapilární elevace a deprese .....	16
2.3.6	Lucasův - Washburnův vztah .....	17
2.4	Hodnocení anizotropie rovinných vlákných systémů .....	19
2.5	Teoretická analýza problému .....	21
2.5.1	Zařízení pro výrobu orientované vrstvy.....	21
2.5.2	Výsledky práce Korneva et al. ....	23
3	Experimentální část.....	25
3.1	Výroba vzorků.....	25
3.1.1	Výroba orientované nanovlákněné vrstvy .....	25
3.1.2	Výroba neorientované nanovlákněné vrstvy.....	26
3.2	Měření úhlu smáčení .....	26
3.3	Metoda testování smáčivosti vyrobených vzorků.....	27
3.3.1	Testování smáčivosti orientovaných vrstev bez krycího skla.....	28
3.3.2	Testování smáčivosti orientovaných vrstev s krycím sklem .....	28
3.3.3	Testování smáčivosti neorientovaných vrstev s krycím sklem.....	29
3.4	Vyhodnocení snímků elektronovým mikroskopem .....	29
3.5	Popis anizotropie nanovlákněných vrstev .....	30
3.6	Výsledky měření .....	31
3.6.1	Smáčení orientované nanovlákněné vrstvy bez krycího skla .....	32
3.6.2	Smáčení orientované nanovlákněné vrstvy s krycím sklem .....	34
3.6.3	Smáčení neorientované nanovlákněné vrstvy s krycím sklem .....	35
4	Závěr .....	37
5	Literatura.....	39
6	Seznam obrázků, grafů a tabulek .....	42
7	Seznam příloh .....	44



## 1 Úvod

Smáčení je vzájemné působení kapaliny a pevného povrchu. Jedná se o schopnost textilie transportovat a zadržovat kapalinu zpravidla v mezivláknenných prostorech její vnitřní struktury. Na smáčivost textilie má vliv tvar a morfologie vláken, úprava povrchu vláknenného materiálu, orientace a geometrie vláken, způsob zpevnění vláknenné vrstvy, fyzikální charakteristiky i chemické složení kapalně látky [1].

Smáčení a vzlínání kapalin do vláknenných struktur do značné míry ovlivňuje zejména spotřebitelské vlastnosti. Tento jev hraje důležitou roli v řadě technologických postupů, průmyslových aplikací a také při užívání finálních výrobků textilního průmyslu. Příkladem může být likvidace ropných havárií i používání výrobků osobní hygieny.

Samovolné vzlínání kapaliny v nanovláknenných vrstvách je dosud nedostatečně teoreticky prozkoumáno. Řada prací je věnována dynamice procesu, kde bylo navrženo mnoho modelů, z nichž většina je založena na Lucas-Washburnově vztahu pro rychlost pronikání kapaliny do kapiláry.

Cílem této práce je analyzovat rozdíly smáčení struktur nanovláknenných vrstev, jejichž vlákna jsou orientovaná nebo náhodně uspořádaná.

V teoretické části práce je popsán technologický postup výroby vláken elektrostatickým zvlákněním a je zde také charakterizován polymer PCL s kapalinami, které byly použity pro experimentální část této práce. Následně jsou uvedeny základy teorie smáčení a vzlínání a způsob hodnocení anizotropie rovinných vláknenných systémů. Závěr teoretické části práce je zaměřen na některá již použitá zařízení pro výrobu orientovaných nanovláknenných vrstev a také na práci Korneva et al., kteří se zabývali problematikou vzlínání kapalin do nanovláknenné příze.

V následující kapitole je uveden experiment popisující výrobu orientovaných a neorientovaných nanovláknenných vrstev, dále měření úhlu smáčení a chování kapky nanosené na vyrobených vzorcích. V závěru této kapitoly je také uveden postup pro vyhodnocení anizotropie nanovláknenných vrstev pomocí snímků elektronového mikroskopu. Jsou zde také uvedeny výsledky měření a posouzení možnosti ovlivnění smáčení pomocí struktury nanovláknenné vrstvy.

## 2 Teoretická část

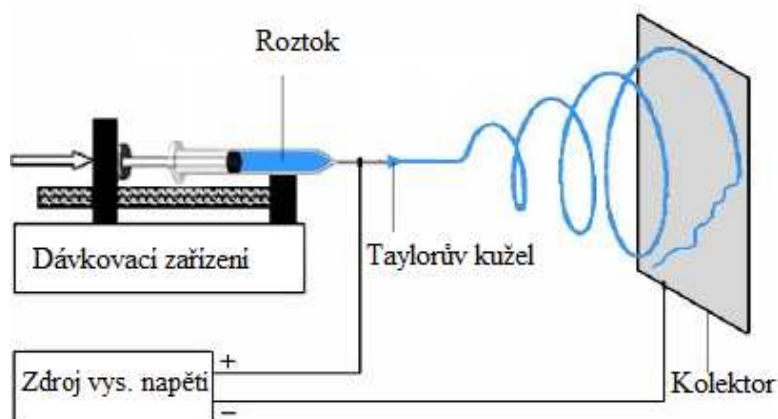
Teoretická část práce v kapitole 2.1 popisuje nejen zařízení a technologický postup výroby, ale i procesní a materiálové charakteristiky ovlivňující tvorbu vláken. V kapitole 2.2 je charakterizován polymer PCL s použitými kapalinami. V kapitole 2.3 jsou popsány základní pojmy a vztahy týkající se procesu smáčení a vztlínání a následně je v kapitole 2.4 uvedeno hodnocení anizotropie rovinných vlákenných systémů. Kapitola 2.5 se věnuje teoretické analýze problému zabývající se volbou vhodného kolektoru a dále také prací Korneva et al.

### 2.1 Elektrostatické zvlákňování

Elektrostatické zvlákňování je způsob přípravy velmi jemných vláken z polymerního roztoku nebo taveniny pomocí elektrostatických sil. Ke zvlákňování se používají různé druhy přírodních i syntetických polymerů. Tato vlákna, jejichž průměr se pohybuje do 1  $\mu\text{m}$ , se vyznačují velkým měrným povrchem, velkou pórovitostí vlákenné vrstvy a malým rozměrem pórů [2].

#### 2.1.1 Proces elektrostatického zvlákňování

Pro přípravu vláken jehlovým zvlákňováním je využíváno vysokého napětí, které je přivedeno na kovovou část jehly. Polymerní roztok v injekční jehle vložené v dávkovacím zařízení je následně zvlákňěn. Díky vysokému napětí přivedenému na kovovou část jehly vzniká mezi uzemněným kolektorem a jehlou tzv. Taylorův kužel, ze kterého jsou produkována nanovlákna a ukládána na povrchu kolektoru dle *obr. 1*. Po odpaření rozpouštědla dojde k vytvoření nanovlákenné vrstvy [2].



Obr. 1: Schéma principu elektrostatického zvlákňování [3]

Existuje mnoho technologických úprav tohoto zařízení, které se snaží o rozšíření možností příprav nanovláknenných vrstev, zvýšení produktivity a efektivnosti elektrostatického zvlákňování. Mezi tyto úpravy patří například použití rotačního válce, paralelních elektrod nebo disku jako kolektor apod.

### 2.1.2 Parametry elektrostatického zvlákňování

Velmi důležitý vliv na tvorbu vláken mají procesní a materiálové podmínky. Mezi procesní charakteristiky patří použité napětí, vzdálenost kolektoru od zvlákňovací trysky, elektrické vlastnosti podpůrného materiálu i okolní parametry jako například teplota, rychlost a vlhkost vzduchu. Materiálovými parametry jsou především vlastnosti zvlákňovaného materiálu - molekulová hmotnost polymeru, typ rozpouštědla, koncentrace, teplota taveniny, aditiva, elektrická vodivost roztoku nebo taveniny, povrchové napětí i viskozita. Hodnocenými vlastnostmi získaných materiálů jsou morfologie vláknenné vrstvy, průměr vláken, velikost mezivláknenných pórů, prodyšnost, počet a velikost defektů vrstvy apod. [2].

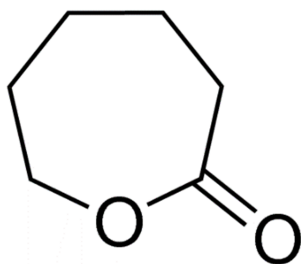
## 2.2 Polymer PCL a použité kapaliny

Pro experimentální část této práce byl použit polymer polykaprolakton a jako rozpouštědlo chloroform s ethanolem. Pro testování smáčení vyrobených vzorků byla použita destilovaná voda obarvená inkoustem.

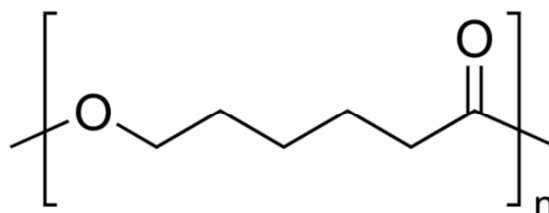
### 2.2.1 Polykaprolakton

Polykaprolakton (dále jen PCL) je semikrystalický biologicky degradovatelný polymer, který patří mezi polyestery. PCL je rozpustný v chloroformu, toluenu, dichloromethanu, cyklohexanu a oxidech chloridu. Tento polymer se připravuje otevřením cyklického monomeru  $\epsilon$ -kaprolaktonu (viz *obr. 2*) a jeho molekulová hmotnost se pohybuje v rozmezí od 3 000 do 80 000 g/mol. Skelný přechod PCL nastává při 60 °C a teplota tání se pohybuje mezi 59 a 64 °C [4]. Jeho pevnost v tahu je 10 MPa, tažnost 300 % a Youngův modul pružnosti 1,2 GPa [5]. Chemická struktura PCL je zobrazena na *obr. 3*.

Nízká teplota tání, špatná hydrofilicita a pomalá rychlost degradace PCL však omezují jeho využití. Kopolymerací  $\epsilon$ -kaprolaktonu s dalšími estery, jako je glykolid, laktid, methakrylát, lze rozšířit jeho aplikace v lékařství. Mezi oblasti využití v současné době patří tkáňové inženýrství regenerací pokožky, dlouhodobé uvolňování léčiv i nanokompozity pro regeneraci kostí [6].



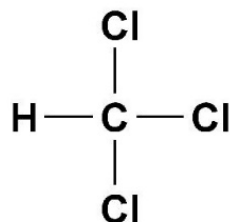
Obr. 2: Chemická struktura  $\epsilon$ -kaprolaktonu [7]



Obr. 3: Chemická struktura PCL [8]

### 2.2.2 Chloroform

Chloroform, jehož systematický název je trichlormethan, je bezbarvá, těkavá kapalina s nasládlým zápachem. Sumární vzorec chloroformu je  $\text{CHCl}_3$  a jeho strukturní vzorec je zobrazen na obr. 4. Jedná se o kapalinu s teplotou tání  $-63,4\text{ }^\circ\text{C}$  a teplotou varu  $61,17\text{ }^\circ\text{C}$ . V současné době se chloroform používá jako rozpouštědlo a při výrobě chladicího media pro ledničky, freonu [9].

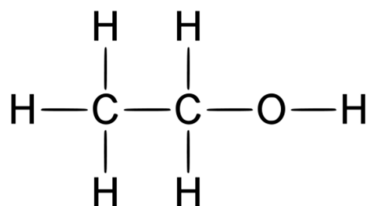


Obr. 4: Strukturní vzorec chloroformu [9]

### 2.2.3 Ethanol

Ethanol neboli ethylalkohol je bezbarvá kapalina s funkčním vzorcem  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  a s velmi charakteristickou vůní, která patří mezi hořlaviny. Jeho teplota tání je  $117,3\text{ }^\circ\text{C}$  a teplota varu  $78,5\text{ }^\circ\text{C}$ . Ethanol je neomezeně mísitelný ve vodě a jeho strukturní vzorec je zobrazen na obr. 5 [10].

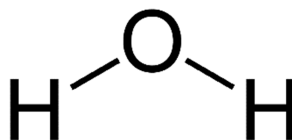
Jedná se o alkohol, který se připravuje z jednoduchých sacharidů alkoholovým kvašením za působení enzymů. Kvašením se získá zhruba 10% roztok ethanolu. Používá se jako rozpouštědlo, při výrobě alkoholických nápojů i čisticích prostředků [10].



Obr. 5: Strukturní vzorec ethanolu [11]

### 2.2.4 Destilovaná voda

Destilovaná voda je voda, která prošla procesem destilace a byla zbavena rozpuštěných minerálních látek. Varu dosahuje při teplotě 100 °C a její teplota tání je 0 °C. Jedná se o bezbarvou, v silné vrstvě namodralou kapalinu bez chuti a zápachu, jejíž hustota je 1 g/cm<sup>3</sup> při 3,98 °C. Destilovaná voda je téměř nevodivá a její chemický vzorec je H<sub>2</sub>O zobrazený na obr. 6 [12].



Obr. 6: Strukturální vzorec vody [12]

## 2.3 Základy teorie smáčení a vzlínání

Smáčení je vzájemné působení kapaliny a pevného povrchu. Jedná se o schopnost textilie transportovat a zadržovat kapalinu zpravidla v mezivláknenných prostorech její vnitřní struktury. Na smáčivost textilie má vliv tvar a morfologie vláken, úprava povrchu vláknenného materiálu, orientace a geometrie vláken, způsob zpevnění vláknenné vrstvy, fyzikální charakteristiky i chemické složení kapalné látky [1].

Proces, který je řízen kapilárními tlaky, je nazýván vzlínání, kdy kapalina samovolně proniká do kapiláry. Vzlinání však probíhá jen tehdy, jestliže je povrch kapiláry kapalinou smáčen. Jedná se o proudění tekutiny v pórovité struktuře textilie [13].

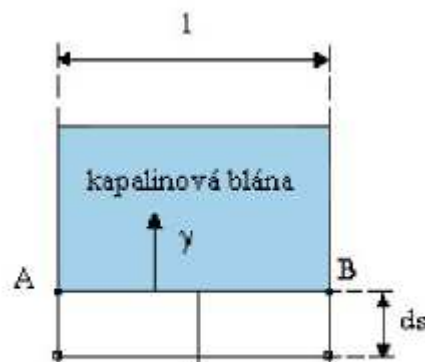
### 2.3.1 Povrchové napětí

Povrchové napětí je fyzikální vlastnost kapaliny, jejíž povrch je tvořen tenkou pružnou vrstvou, která se snaží zaujmout kulový tvar s co nejmenší plochou. Povrchová vrstva je velmi tenká (její tloušťka je asi 10<sup>-7</sup> cm) a její fyzikální a chemické vlastnosti jsou jiné než vlastnosti vnitřních částí kapalin [14].

Povrchové napětí umožňuje vodoměrkám pohybovat se po vodní hladině a také způsobuje, že některé drobné předměty lze položit na vodní hladinu a nepotopí se (viz obr. 7) [15].



Obr. 7: Listy pohybující se na vodní hladině [15]



Obr. 8: Drátěný rámeček s pohyblivým raménkem [16]

Protože se povrchová blána snaží stáhnout na co nejmenší velikost, je v ní napětí, které je nazýváno povrchovým napětím  $\gamma$ . Povrchové napětí lze vysvětlit pomocí Maxwellova pokusu znázorněného na obr. 8. Jestliže je drátěný rámeček s pohyblivým raménkem  $AB$  ponořen do mýdlového roztoku, vytvoří se na něm vlivem povrchového napětí tenká blána s vrstvami po obou stranách. Pro udržení blány v rovnováze je potřeba působit silou  $F$  na pohyblivé raménko délky  $l$ . Síla působící na jednotkovou délku raménka je rovna povrchovému napětí  $\gamma$  s jednotkou  $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$  a lze vyjádřit vztahem

$$\gamma = \frac{F}{2l}. \quad (1)$$

Hodnotu povrchového napětí lze ovlivnit nejen druhem kapaliny, ale i prostředím, které se nachází nad volným povrchem zkoumané kapaliny. Povrchové napětí s rostoucí teplotou klesá a v kritickém stavu, kdy mizí rozhraní mezi plynnou a kapalnou fází, dochází k jejímu snížení na nulu [17]. Dále lze povrchové napětí ovlivnit přidáním povrchově aktivních látek neboli tenzidů, které jsou schopny se již při nízké koncentraci nahromadit na fázovém rozhraní, a tím snižovat mezifázovou energii soustavy. Podle ionicity lze tenzidy rozdělit na neionické a ionické, které se dále dělí na anionické, kationické a amfoterní [18].

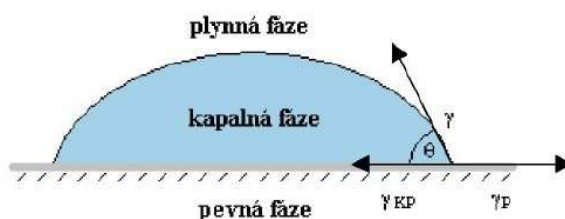
### 2.3.2 Kontaktní úhel a Youngova rovnice

Kontaktní úhel se nachází mezi tečnou povrhu kapaliny a rovinou podložky. Místo, kde dochází k měření tohoto úhlu, se nazývá na rozhraní tří fází, mezi kapalinou a plynem, mezi látkou a plynem a mezi pevnou látkou a kapalinou [19]. Úhel máčení popisuje míru smáčení pevného povrchu kapalinou v místně rozhraní plyn – kapalina – pevná látka (viz obr. 9) a lze vyjádřit jako

$$\cos \theta = \frac{\gamma_p - \gamma_{kp}}{\gamma}, \quad (2)$$

kde veličina  $\theta$  je hodnota úhlu smáčení,  $\gamma$  je povrchové napětí kapaliny,  $\gamma_p$  je povrchové napětí na rozhraní pevná látka – plyn a veličina  $\gamma_{kp}$  značí povrchové napětí na rozhraní pevná látka – kapalina.

Je-li hodnota úhlu smáčení  $\theta > 90^\circ$  kapalina nesmáčí pevný povrch. Jestliže  $\theta < 90^\circ$  kapalina povrch pevné látky smáčí. Dokonalé smáčení nastává při hodnotě  $\theta = 0^\circ$  a v případě, že  $\theta = 180^\circ$ , tak kapalina stěnu dokonale nesmáčí [20].



Obr. 9: Grafické zobrazení úhlu smáčení [16]

Jestliže povrch pevné látky je zcela rovný a k pronikání kapaliny do povrchu pevné látky nedochází, lze tento rovnovážný stav složek povrchových napětí  $\gamma$ ,  $\gamma_p$ ,  $\gamma_{kp}$  popsat pomocí Youngovy rovnice, kdy platí

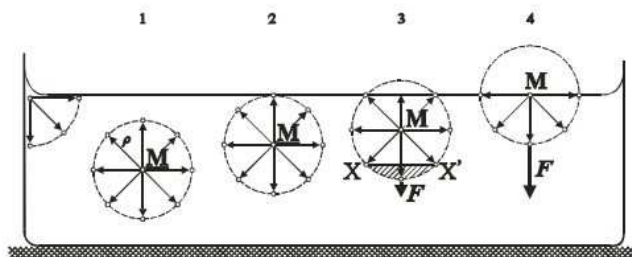
$$\gamma_p = \gamma \cos \theta + \gamma_{kp}. \quad (3)$$

### 2.3.3 Kohezní tlak

Povrchová vrstva je složena z vrstvy molekul, které na sebe vzájemně působí přitažlivými mezimolekulovými silami, tzv. kohezními silami. Vlivem těchto sil vzniká na povrchu kapaliny tenká vrstva s odlišnými vlastnostmi, než mají vnitřní vrstvy kapaliny. Jestliže se zvětší povrch kapaliny, tak dojde k překonání kohezní síly a některé molekuly se dostanou zvnitřku na povrch. Každá molekula se nachází ve středu kulovitého prostoru neboli sféry molekulárního působení, jejíž poloměr je nazýván poloměrem molekulárního působení [14].

Na obr. 10 jsou znázorněny síly, kterými okolní molekuly působí na molekulu M. Okolní molekuly působící uvnitř kapaliny na molekulu 1 mají výslednici přitažlivých sil nulovou a jsou v rovnováze. V případě molekuly 2, jejíž sféra molekulového působení se dotýká povrchu, jsou síly také v rovnováze. Na molekulu 3 umístěné v povrchové vrstvě kapaliny působí síly okolních molekul, jež nejsou v rovnováze, a jejich výsledná

síla  $F$  směřuje dovnitř kapaliny. Výsledná síla  $F$  směřující do kapaliny dosáhne maximální hodnoty pro molekulu 4, kdy je v kapalině pouze polovina sféry molekulového působení [21]. Vlivem těchto kohezních sil je tlak na povrchu kapaliny menší než uvnitř a vzrůstá směrem dovnitř kapaliny. Tento tlak se nazývá tlakem kohezním, jež dosahuje maximální hodnoty ve vzdálenosti, která je rovna poloměru sféry molekulárního působení [14].



Obr. 10: Povrchová vrstva kapaliny [21]

### 2.3.4 Kapilární tlak

Kapilární tlak  $p_k$  neboli Laplaceův tlak je přídavný tlak, který je způsoben pružností povrchové vrstvy a vzniká zakřivením povrchu v úzkých trubicích, v kapilárách, u stěn nádoby, v mýdlových bublinách apod. Ve srovnání s vodorovným povrchem je vnitřní tlak pod vypuklým (konvexním) povrchem větší o kapilární tlak. Naopak tomu je u vnitřního tlaku pod dutým (konkávním) povrchem, kdy je tento tlak menší o tlak kapilární (viz obr. 11) [22].



Obr. 11: Vypuklý (konvexní) a vydutý (konkávní) povrch kapaliny [17]

Má-li povrch kapaliny tvar kulového vrchlíku (koule), je kapilární tlak  $p_k$  dán vztahem

$$p_k = \frac{2\gamma}{R}, \quad (4)$$

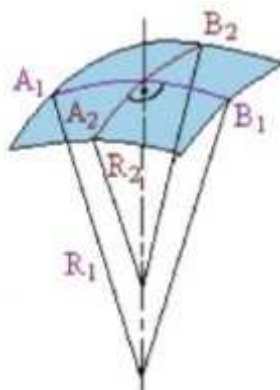
kde veličina  $\gamma$  je hodnota povrchového napětí kapaliny a  $R$  je poloměr kruhového povrchu. Jednotkou kapilárního tlaku je Pa [22].

Při obecně zakřiveném povrchu můžeme v každém jeho bodě vést dva k sobě kolmé normálové řezy  $A_1B_1$  a  $A_2B_2$  (viz obr. 12), v nichž má plocha největší a nejmenší



poloměr křivosti  $R_1$  a  $R_2$  [14]. Kapilární tlak  $p_k$ , který vzniká u obecně zakřiveného povrchu, je součtem tlaku  $p_1$  vzniklým zakřivením  $A_1B_1$  o poloměru křivosti  $R_1$ , a tlaku  $p_2$ , jež byl způsoben zakřivením  $A_2B_2$  o poloměru křivosti  $R_2$ . Potom platí Laplaceův vztah

$$p_k = p_1 + p_2 = \frac{\gamma}{R_1} + \frac{\gamma}{R_2} = \gamma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (5)$$



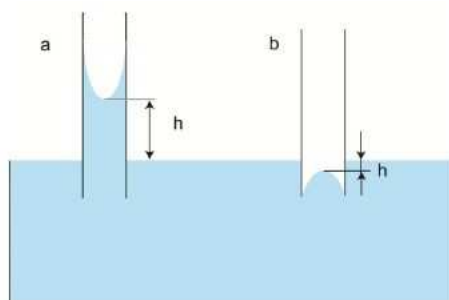
Obr. 12: Určení kapilárního tlaku pod zakřiveným povrchem kapaliny [16]

### 2.3.5 Kapilární elevace a deprese

Kapilární elevace a deprese jsou souhrnným názvem označovány jako kapilarita, jež popisuje vzestup nebo pokles (viz obr. 13) kapaliny o výšku  $h$  ve svislých kapilárách s vnitřním poloměrem  $R$ . Při tomto jevu dochází k zakřivení vodní hladiny a tvorbě menisku, který je buď vydutý (konkávní) nebo vypouklý (konvexní). Pro výšku  $h$  platí vztah

$$h = \frac{2\gamma}{\rho g R}, \quad (6)$$

kde veličina  $\gamma$  je hodnota povrchového napětí,  $\rho$  je hustota kapaliny a  $g$  značí gravitační zrychlení.



Obr. 13: Kapilární elevace (a) a deprese (b) [23]

Dojde-li ke zvýšení volné hladiny v kapiláře, než je okolní vodorovný povrch kapaliny, a smáčení vnitřní stěny kapiláry kapalinou, je tento jev nazýván jako kapilární elevace neboli vzlínavost. Těsně pod vzniklým dutým povrchem v kapiláře je vnitřní tlak menší než pod rovinným povrchem kapaliny v nádobě, a to o kapilární tlak [22]. Kapalína bude stoupat v trubici do té doby, dokud nebude kapilární tlak vyrovnán s hydrostatickým tlakem sloupce stoupající kapaliny. Tento vztah lze popsat gravitačním zrychlením  $g$ , výškou výstupu  $h$  v kapiláře a hustotami kapaliny a vzduchu  $\rho_1, \rho_2$ , tj

$$p_1 = h(\rho_1 - \rho_2)g. \quad (7)$$

Naopak tomu je při kapilární depresi, kdy je meniskus vypouklý nahoru a snížení hladiny kapaliny v kapiláře níž než okolní vodorovná hladina je způsobeno dodatečným kapilárním tlakem. V tomto případě kapalína nesmáčí vnitřní stěny kapiláry [23].

### 2.3.6 Lucasův - Washburnův vztah

Rychlost nasávání kapaliny do vlákného materiálu popisuje Lucasův - Washburnův vztah pomocí jedné kapiláry, kde je kapalína uvnitř kapiláry transportována díky povrchovému napětí. Lucasův - Washburnův vztah lze odvodit ze vztahů pro objem  $V$  newtonovské viskózní kapaliny o viskozitě  $\mu$ , který proteče za čas  $t$  trubicí o poloměru  $r$  a délce  $h$ , mezi jejímiž konci je rozdíl tlaků ( $p_1 - p_2$ ). Tok  $dV/dt$  trubicí je dán vztahem odvozovaným v teorii kontinua, označovaným jako Hagenův - Poisseuilleův zákon, viz rovnice (8) [24].

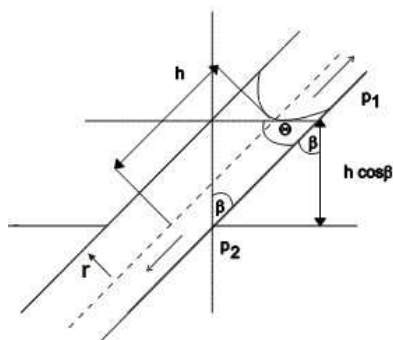
$$\frac{dV}{dt} = \frac{\pi(p_1 - p_2)r^4}{8h\mu} \quad (8)$$

V kapiláře vzniká tlak  $p_1$  díky zakřivenému povrchu kapaliny s povrchovým napětím  $\gamma$ . V případě, že meniskus kapaliny svírá se stěnou kapiláry úhel, je tlak  $p_1$  určen vztahem

$$p_1 = \frac{2\pi r \gamma \cos \theta}{\pi r^2} = \frac{2\gamma \cos \theta}{r}. \quad (9)$$

Meniskem kapaliny je označován její tvar v blízkosti styku se smáčeným objektem. Tlak  $p_2$  v kapiláře ve výšce odpovídající okolní hladině kapaliny je hydrostatickým tlakem (viz obr. 14). Tento vztah popisuje rovnice (10), kde úhel  $\beta$  je ostrý úhel sevřený osou kapiláry a kolmicí k hladině [24].

$$p_2 = \rho g h \cos \beta \quad (10)$$



Obr. 14: Kapilára vnořená do kapaliny s přirozenou hladinou a meniskem [20]

Objem kapaliny v kapiláře vystupující nad hladinu lze vyjádřit jako

$$V = \pi r^2 h. \quad (11)$$

Z předcházejících vztahů dostaneme

$$\frac{\pi r^2 dh}{dt} = \frac{\pi r^4}{8\mu h} \left( \frac{2\gamma \cos \theta}{r} - \rho g h \cos \beta \right). \quad (12)$$

Rychlost postupu tekutiny při vztlínání v kapiláře lze popsat veličinou  $dh/dt$ , která je vyjádřena z předchozí rovnice (12) jako

$$\frac{dh}{dt} = \frac{r\gamma \cos \theta}{4\mu h} - \frac{r^2 \rho g \cos \beta}{8\mu}. \quad (13)$$

Předpokládá se, že kapilára je dostatečně malá pro to, aby si postupující kapalinový meniskus zachoval tvar kulového vrchlíku neporušeného gravitací. Malý průměr kapiláry zajistí rychlé vytvoření menisku při vnoření kapiláry do kapaliny. Pro kapaliny podobné vodě jsou výše uvedené požadavky splněny pro kapiláry o poloměru menším než 0,3 mm [24].

Předpokládáme-li, že na pravé straně rovnice (13) je druhý člen zanedbatelný oproti členu prvnímu, potom dostaneme

$$\frac{dh}{dt} = \frac{r\gamma \cos \theta}{4\mu h}, \quad (14)$$

kde veličina  $h$  je hodnotou výšky tekutiny v kapiláře,  $\gamma$  je povrchové napětí,  $r$  je poloměr kapiláry, veličina  $\mu$  značí viskozitu tekutiny a  $\theta$  je úhel, který svírá meniskus se stěnou kapiláry.

Za podmínky  $h = 0$  pro  $t = 0$  dostaneme

$$h = \sqrt{\frac{r\gamma \cos \theta t}{2\mu}} = Kt^{1/2}, \text{ kde } K = \sqrt{\frac{2\gamma \cos \theta}{2\mu}}. \quad (15)$$

Vztah (15) se používá k popisu pronikání kapalin do porézních prostředí. Prostředí se přitom modeluje jako soustava rovnoběžných válcových kapilár [24].

Vliv na rychlost pronikání tekutiny do vláknenného prostředí má tedy povrchové napětí kapaliny  $\gamma$ , viskozita kapaliny  $\mu$ , poloměr kapiláry  $r$  a úhel smáčení  $\theta$ .

## 2.4 Hodnocení anizotropie rovinných vláknenných systémů

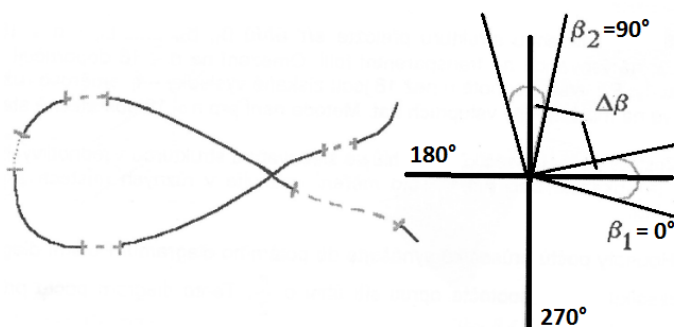
Pomocí jednoduché grafické metody lze u rovinných vláknenných systémů jako například u pavučiny, tenkých roun, tkanin a pletenin vyhodnotit anizotropii neboli závislost vlastností materiálu na směru. Jak však anizotropii naměřit?

Představme si niť o celkové délce  $L$ , která je umístěna v rovině. Jestliže do stejně velkých intervalů úhlu  $(\beta_i - \Delta\beta/2, \beta_i + \Delta\beta/2)$  nesměřují úseky nitě stejné celkové délky, tak se tento jev nazývá anizotropie. Z obr. 15 je patrné, že do intervalu úhlů  $(\beta_1 - \Delta\beta/2, \beta_1 + \Delta\beta/2)$  směřují ty úseky nitě, které jsou označeny - - -. Do intervalu úhlů  $(\beta_2 - \Delta\beta/2, \beta_2 + \Delta\beta/2)$  směřuje úsek označený ..... Celková délka čárkovaných a plných úseků je obecně různá.

Charakteristikou anizotropie je úhlová hustota délek nitě  $f(\beta)$ . Tato hustota určuje délku úseků nitě  $L(\beta, \Delta\beta)$  směřujících do úhlového rozmezí  $\beta \pm \Delta\beta/2$  pomocí vztahu

$$L(\beta, \Delta\beta) = L \int_{\beta - \Delta\beta/2}^{\beta + \Delta\beta/2} f(\beta) d\beta, \quad (16)$$

kde  $L$  je celková délka nitě a funkce  $f(\beta)$  značí směrovou růžici neboli texturní funkci [25].

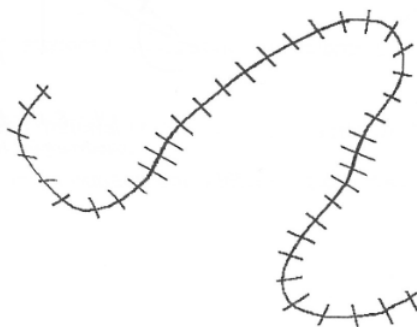


Obr. 15: Niť a intervaly úhlů [25]

Nejjednodušší způsob určení charakteristik anizotropie je rozdělením nitě na malé rovné úseky (viz obr. 16). Nejprve však určíme, ve kterém místě má niť největší křivost.

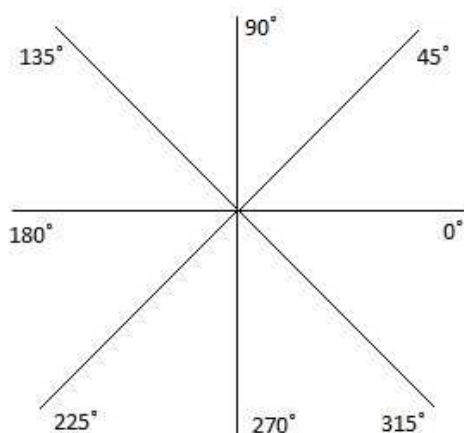
Potom ve stejném místě zvolíme malý úsek, který můžeme považovat za natolik rovný,

že směr nitě v úseku obsažený se téměř neliší od směru nejkratší spojnice krajních bodů úseku. Poté na úseky stejné délky, jako je tento, rozdělíme celou niť a u každého úseku určíme hodnotu  $\beta$ . Hledanou charakteristiku (například veličinu  $L(\beta, \Delta\beta)$ ) zjistíme roztříděním úseků dle hodnoty  $\beta$  a sečtením jejich délek v každém zvoleném intervalu ( $\beta - \Delta\beta/2, \beta + \Delta\beta/2$ ).

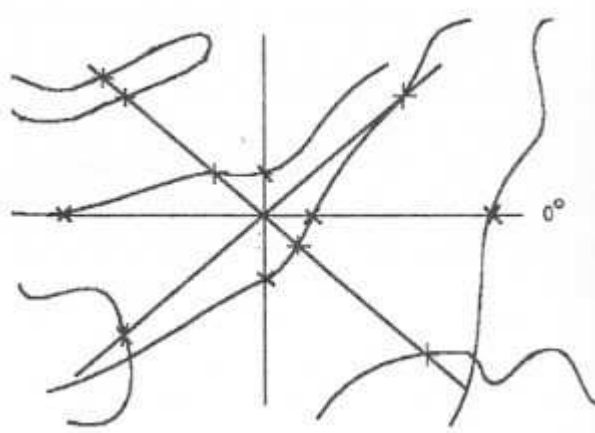


Obr. 16: Rozdělení nitě na malé rovné úseky pro určení anizotropie [25]

Tento postup je však velice časově náročný, proto se pro získání charakteristiky anizotropie používá průsečková růžice, z níž lze grafickou metodou získat růžici směrovou. Nejdříve je přes studovanou strukturu položena síť úhlů se stejně dlouhými rameny (viz obr. 17). Při větším počtu úhlů by však mohlo dojít ke zvýšení citlivosti na malé změny vstupních dat, proto je maximální doporučované množství úhlů 18. Následně jsou spočítány průsečíky vláken se sítí úhlů v jednotlivých směrech (viz obr. 18) a hodnoty počtů průsečíků jsou vyneseny do nové sítě úhlů neboli polárního diagramu s pootočením o  $90^\circ$ .

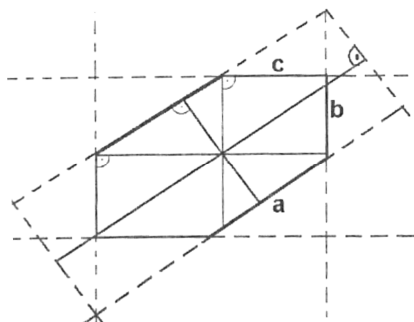


Obr. 17: Síť úhlů se stejně dlouhými rameny

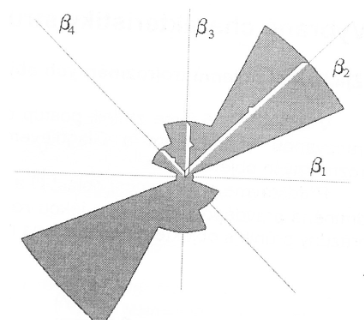


Obr. 18: Průsečíky vláken se studovanou vláknennou strukturou [25]

Dále jsou v koncových bodech průsečkové růžice vztyčeny kolmice, které vymezují v rovině mnohoúhelník, jež se nazývá Steinerův kompak a je zobrazen na *obr. 19*. Poté jsou vzdálenosti vrcholů mnohoúhelníku v souhlasném směru se směry stran Steinerova kompaktu přeneseny do nově vytvořené sítě úhlů (viz *obr. 20*), čímž vznikne odhad směrové růžice znázorňující orientaci vláken [25].



*Obr. 19: Steinerův kompak [25]*



*Obr. 20: Odhad směrové růžice  $f(\beta)$*

## 2.5 Teoretická analýza problému

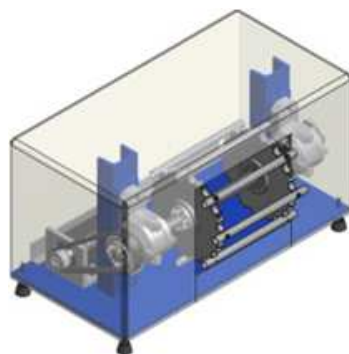
V této kapitole jsou vybírány vhodné kolektory, které by v našich pokusech mohly být použity pro zachytávání orientované nanovláknenné vrstvy. Dále je zde popsána experimentální práce Korneva et al., v níž se zabývají problematikou vzlínání v nanovláknenné přízi.

### 2.5.1 Zařízení pro výrobu orientované vrstvy

Výroba orientované nanovláknenné vrstvy závisí nejen na kolektoru, ale také na použitém polymerní roztoku, rychlosti dávkovacího zařízení, velikosti vysokého napětí, vzdálenosti kolektoru od jehly apod.

#### 2.5.1.1 Rotační válcový kolektor

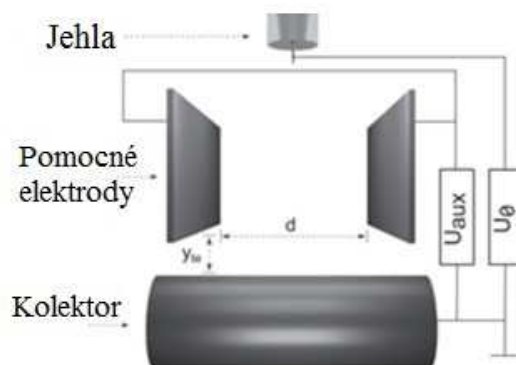
Práce Doergens et al. [26] ukazuje, že pomocí rotačního válcového kolektoru vytvořeného z osmi drátků ve vzdálenosti 70 mm (viz *obr. 21*) lze úspěšně vyrobit orientovanou nanovláknennou vrstvu. Ve svém experimentu použili kolektor s průměrem 21,2 cm a přiváděné vysoké napětí na jehlu 18 kV. Polymerní roztok PCL vytlačovaný přes injekční jehlu rychlostí 4 ml/h byl ukládán na kolektoru rotujícím rychlostí 900 ot/min ve vzdálenosti 15 cm.



Obr. 21: Rotační válcový kolektor z drátků [26]

Podle experimentů Guiying Liao et al. [27] lze také docílit vysoce orientovaných vláken obalením uzemněného rotačního válcového kolektoru hliníkovou fólií. Použité vysoké napětí bylo 20 kV a vzdálenost jehly od kolektoru, který rotoval rychlostí 3000 ot/min, byla 20 cm.

Matthias M. L. Arras et al. [28] se dále pokusili o snížení nestability a ve svých pokusech použili dvě pomocné elektrody ve velikosti  $12 \times 12 \times 0,2$  cm o stejném přiváděném napětí a se stejnou polaritou jako má jehla. Pomocné elektrody, jejichž schéma je zobrazeno na obr. 22 byly umístěny 12 cm od sebe a 2 cm od rotujícího kolektoru. Usměrněný polymerní roztok byl vytlačován přes jehlu rychlostí 0,01 ml/min a ukládán na kolektor. Ze snímků rastrovacího elektronového mikroskopu je zřejmé, že vlákna ve vrstvě jsou opravdu orientovaná.



Obr. 22: Kolektor se dvěma pomocnými elektrodami [28]

Sejmutí těchto elektrostaticky zvlákněných vláken z rotačního kolektoru by však vzhledem k jejich vysoké jemnosti mohlo být v našem experimentu problematické. Velmi snadno by mohlo dojít při manipulaci s vláknennou vrstvou k její deformaci.

### 2.5.1.2 Paralelní elektrody

V dalším experimentu se Beachley [29] pokusil zvláknit roztok PCL z jehly rychlostí 0,010 - 0,025 ml/min pod napětím 10 - 20 kV mezi dvě uzemněné paralelní elektrody o různých rozměrech  $30.5 \times 7.5 \times 0.7$ ,  $15 \times 4 \times 0.35$  a  $7.5 \times 2 \times 0.15$  cm. Vlákna byla úspěšně zachytávána napříč elektrodami až do délky 50 cm a z pohledu sejmutí vlákenné vrstvy z elektrod se tato metoda pro nás jeví jako vhodná.

Mei-Chin Chen [30] také dokázal, že k vytvoření vysoce orientované vlákenné vrstvy lze využít magnetického pole. Ve svých pokusech použil jako kolektor dva magnety o velikosti  $60 \times 20 \times 30$  mm, které umístil paralelně nesouhlasnými póly k sobě, mezi nimiž nechal mezeru 30 mm. Pro zabránění přímého kontaktu magnetů vložil do mezery akrylovou destičku. Polymerní roztok PCL byl vytlačován přes injekční jehlu, na kterou bylo přiváděno napětí o velikosti 20 kV, rychlostí 0,1 ml/h a následně byl tento roztok ukládán na kolektor ve vzdálenosti 15 cm.

V případě neúspěchu výroby orientované vlákenné vrstvy pomocí metody dvou uzemněných paralelních elektrod jako kolektor by tedy v našich pokusech bylo možné využít jako kolektor dva magnety.

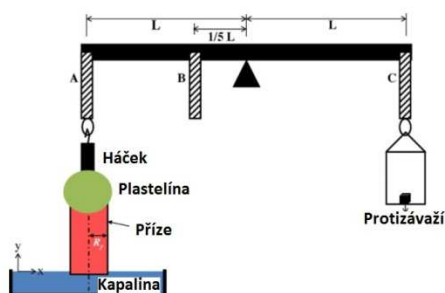
### 2.5.2 Výsledky práce Korneva et al.

Problematikou smáčení kapaliny do nanovlákněných struktur se zabývali již Kornev et al., kteří ve své práci [31] popsali proces vzlínání v nanovlákněné přízi. Pro vytvoření vláken z acetátu celulózy (dále jen CA) a z polymetylmakrylátu (dále jen PMMA) využili jehlového zvláknění a rotačního kolektoru. Následně z těchto vláken pomocí zákrutového zařízení vyrobili směšové příze CA/PMMA. V jejich práci je řešeno vzlínání kapaliny do svislé příze o velikosti 20 mm, která je připevněna pomocí plastelíny k háčku a spodním koncem vnořena do kapaliny (viz *obr. 23*). Při vzlínání do příze kapalina zaujala tvar viditelného menisku, který se během celého experimentu nezměnil a je zobrazen na *obr. 24*. Jakmile meniskus dosáhl svého rovnovážného stavu, byl kontaktní úhel změřen. Výsledky tohoto pokusu byly porovnány s kontaktními úhly smáčení povrchů vyrobených elektrostaticky jen z CA a jen z PMMA.

Kornev et al. zjistili, že kontaktní úhel ( $74^\circ$ ) z experimentů vzlínání vody do kompaktní příze CA/PMMA byl velmi podobný naměřeným hodnotám kontaktních úhlů smáčených nanovlákněných vrstev, které byly vyrobeny pouze z CA nebo pouze z



PMMA ( $71^\circ$ - $72^\circ$ ). Avšak nižší kontaktní úhel byl naměřen na vrstvě vyrobené ze směsi CA/PMMA. Tento jev přisuzovali vysoké drsnosti povrchu, jejíž závislost na velikosti kontaktního úhlu již zmínil Wenzel. Lze tedy říci, že drsnost povrchu zvyšuje její hydrofilitu. Z výsledků také Kornev et al. zjistili, že zvýšením úhlu zákrutu neboli kompaktnosti příze dosáhnou větších hodnot úhlu smáčení.



Obr. 23: Schéma zařízení pro hodnocení vztlínání kapaliny do příze [31]



Obr. 24: Tvar kapaliny po vnoření příze [31]

Pro naše vzorky nanovláčkových vrstev se však použití této metody ke sledování vztlínání kapaliny může jevit jako nevhodné. Vzhledem k vysoké jemnosti vyrobené orientované nanovláčkové vrstvy o malých rozměrech, by mohlo být velmi problematické její upevnění do polohy kolmé k hladině kapaliny. Dalším problémem by také mohlo být oddělení nanovláčkové vrstvy od elektrod, které soužily jako kolektor. Vzájemným oddělením by totiž mohlo dojít k narušení vláčkové struktury, a tím i k nepřesným výsledkům.

Metoda měření kontaktního úhlu na podložním sklíčku by však v našich experimentech proveditelná být mohla. Kornev et al. ve svých pokusech použili jako kapalinu hexadekan a deionizovanou vodu. Jejich vrstva byla pro měření kontaktního úhlu umístěna na podložní sklíčko a předpokládali, že je-li kontaktní úhel  $0^\circ$ , pak vláčková vrstva vypovídá o dokonalé smáčivosti. Zatímco při naměřeném kontaktním úhlu  $180^\circ$  se jedná o povrch nedokonale smáčivý.

### 3 Experimentální část

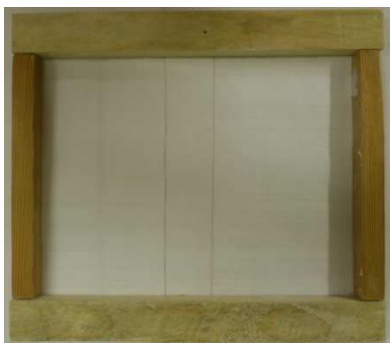
Experimentální část práce byla zaměřena na vytvoření orientované a neorientované nanovláknenné vrstvy a následně na posouzení vlivu struktury na proces smáčení. Experiment byl proveden v laboratoři Katedry netkaných textilií.

#### 3.1 Výroba vzorků

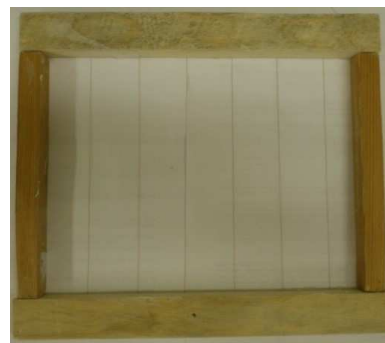
Pro výrobu orientované nanovláknenné vrstvy se jako nejvhodnější jevila metoda od Beachleyho [29], který ve svých pokusech použil jako kolektor dvě uzemněné paralelní elektrody, mezi něž byla vlákna úspěšně zachytávána napříč. V našich pokusech však byla jehla s kolektorem umístěna do jedné roviny, jak již bylo zobrazeno na *obr. 1*. Během našeho experimentu bylo vyzkoušeno několik variant a různých nastavení rychlosti dávkovacího zařízení i vzdálenosti jehly od kolektoru, na který se ukládala právě vytvořená vlákna. Dále byly vyzkoušeny různé koncentrace polymerního roztoku a velikosti přiváděného napětí. Velký vliv na výrobu orientované nanovláknenné vrstvy mělo také nastavení vzdálenosti elektrod. Dalším významným parametrem byla doba zvláknování. S rostoucí dobou procesu totiž docházelo ke snížení vodivosti elektrod, a tím se také snižovala možnost dosažení silných orientovaných vrstev. Zvláknování bylo uskutečněno v laboratoři při teplotě 23 °C a relativní vlhkosti vzduchu 60±3 %.

##### 3.1.1 Výroba orientované nanovláknenné vrstvy

Polymerní roztok PCL o molekulové hmotnosti 43 000 - 50 000 g/mol s koncentrací 14 % a 18 % ve směsi rozpouštědel etanol:chloroform v poměru 1:9 byl vytlačován přes injekční jehlu, na kterou bylo přiváděno napětí o velikosti 20 kV, rychlostí 1,5 ml/h a následně docházelo k ukládání nanovláken na kolektor ve vzdálenosti 15 cm po dobu 5 min. Během prvních pokusů byly použity jako kolektor pouze dvě elektrody (viz *obr. 25*), avšak pro zvýšení produktivity bylo využito více elektrod umístěných paralelně 4 cm od sebe. Vodivé drátky spojené se zemí, jejichž snímek je zachycen na *obr. 26*, sloužily jako elektrody.



Obr. 25: Snímek kolektoru typu paralelní elektrody



Obr. 26: Snímek použitého kolektoru s více paralelními elektrodami

### 3.1.2 Výroba neorientované nanovlákněné vrstvy

Pro posouzení vlivu struktury na proces smáčení je velmi důležitá možnost porovnání orientované nanovlákněné vrstvy s vrstvou, která není orientovaná. Postup výroby neorientované nanovlákněné vrstvy byl velmi obdobný. Lišil se pouze koncentrací použitého polymerního roztoku (20 %) a kolektorem ve formě mřížky (viz obr. 27). Mřížka vyrobená z vodivých drátků byla tvořena čtverci o velikosti 4 x 4 cm.



Obr. 27: Snímek kolektoru typu mřížka

### 3.2 Měření úhlu smáčení

Pro měření kontaktního úhlu byly použity vzorky neorientované nanovlákněné vrstvy, které se lišily koncentrací použitých polymerních roztoků PCL. Tyto vzorky byly vyrobeny elektrostaticky jehlovým zvlákněním, kdy polymerní roztok byl vytlačován rychlostí 1,5 ml/h přes injekční jehlu, na kterou bylo přiváděno napětí o velikosti 20 kV, a následně byl ukládán na papír ve vzdálenosti 20 cm po dobu 10 min.

Vzorek byl poté umístěn na podložní sklíčko a na povrch takto připraveného vzorku byla pomocí pipety nanесena kapka destilované vody. Fotografickým digitálním fotoaparátem byly pořízeny snímky kapek na povrchu vrstev a následně byly pomocí obrazové analýzy softwaru LUCIA G změřeny úhly smáčení kapaliny. V tab. 1 jsou

uvedeny průměrné hodnoty úhlů smáčení nanovlákněných vrstev PCL o koncentracích 8 %, 10 %, 14 % a 16 %, kde  $\theta$  je úhel smáčení a  $s$  je směrodatná odchylka měření.

Tab. 1: Úhly smáčení vrstev v závislosti na koncentraci

Koncentrace [%]	$\theta$ [°]	$s$
8	123,8	3,10
10	123,3	3,39
14	114	4,07
16	109,6	3,04

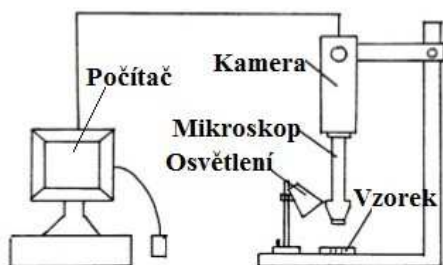
Z naměřených hodnot lze tedy říci, že se jedná o nesmáčivý povrch a s rostoucí koncentrací dochází ke snižování kontaktního úhlu.

### 3.3 Metoda testování smáčivosti vyrobených vzorků

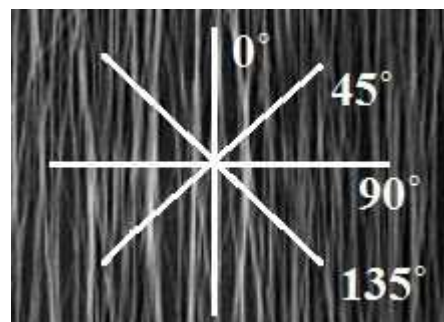
Provedené experimenty lze rozdělit na testování smáčivosti

- orientované nanovlákněné vrstvy bez použití krycího skla (viz kapitola 3.3.1),
- orientované nanovlákněné vrstvy s použitím krycího skla (viz kapitola 3.3.2),
- neorientované nanovlákněné vrstvy s použitím krycího skla (viz kapitola 3.3.3).

Pro každý typ experimentu byla vrstva smáčená kapalinou zachycena na mikroskopu 5krát. Celkem tedy bylo nasnímáno 15 vzorků. Pro předejití zkreslení výsledků byly vzorky odebírány z různých míst vyrobeného materiálu. V experimentu byla při testování smáčení nanovlákněné vrstvy zvolena jako kapalina destilovaná voda, která byla pro zvýšení kontrastu obarvena modrým nebo červeným inkoustem. Každý vzorek byl upevněn na desku plexiskla a vložen pod mikroskop se snímací kamerou (viz obr. 28).



Obr. 28: Schéma uspořádání experimentu při testování smáčivosti [19]



Obr. 29: Odklonění od osy vláken [32]

Postupný prostup kapaliny vrstvou je zaznamenán v určitých časových intervalech po 5 sekundách. Získané obrazy vzorků byly později použity k proměření rozložení

distribuované tekutiny v čase po  $45^\circ$ . Výsledkem byly velikosti kapek ve čtyřech různých směrech odkloněných od osy vláken o  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  a  $135^\circ$  (viz *obr. 29*). Za předpokladu, že nanovláknenná vrstva byla vždy pod mikroskop vkládána stejným směrem, byla základní osa měření ( $0^\circ$ ) rovnoběžná s osou vláken. Velikosti kapek ve směru odklonění od osy vláken o  $90^\circ$  popisují prostup kapaliny kolmo na směr orientace vláken.

Snímky, které byly pořízeny okamžitě po nanesení kapaliny na nanovláknennou vrstvu a po uplynutí určité smáčecí doby, jsou uvedeny u každého vzorku v přílohách A - C společně s naměřenými hodnotami v tabulkách. Pro možnost sledování, zda je jeden směr smáčení upřednostňován nad ostatními směry, jsou ke každému vzorku přiděleny dva grafy, jejichž úhly jsou na sebe kolmé. Naměřené bezrozměrné velikosti kapek byly přepočítány na skutečné pomocí porovnání průměru štěrbinu na snímku a ve skutečnosti.

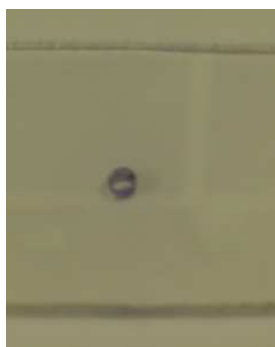
### 3.3.1 Testování smáčivosti orientovaných vrstev bez krycího skla

Pro testování smáčivosti orientovaných nanovláknenných vrstev bez krycího skla byly připraveny vzorky ze 14% roztoku PCL. Destilovaná voda obarvená červeným inkoustem byla na vrstvu nanášena pomocí mikropipety. Po nanesení kapaliny na povrch orientované vrstvy však ke smáčení téměř nedocházelo. Kapalina většinou zůstala na povrchu vláknenné vrstvy ve své energeticky nejvýhodnější pozici, a to ve tvaru koule. Bylo zjištěno, že pokud se elektrostaticky zvlákněné vzorky při testování smáčivosti v místě nanesení kapaliny nedotýkaly spodního skla, tak se jejich vláknenná vrstva jevila jako hydrofobní. Ve většině experimentů tedy ke smáčení povrchu nedocházelo nebo k němu docházelo jen velmi pomalu. Bylo proto třeba navrhnout novou metodiku testování.

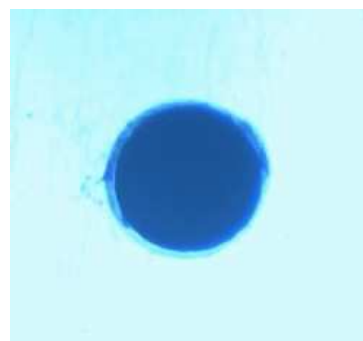
### 3.3.2 Testování smáčivosti orientovaných vrstev s krycím sklem

Při dalším testování smáčivosti orientovaných nanovláknenných vrstev bylo na vláknenný materiál mezi vodivé drátky přiloženo krycí sklo o velikosti  $3,5 \times 3,5$  cm s vyvrtaným otvorem kulovitého tvaru o průměru 3 mm. Krycí sklo zobrazené na *obr. 30* bylo na vrstvu umístěno tak, aby se vzorek z vrchní strany dotýkal krycího skla a ze spodní strany i skla podložního. Vláknenná vrstva byla vyrobena z 18% roztoku PCL a kapky destilované vody obarvené modrým inkoustem byly nanášeny pomocí mikropipety

přímo do štěrbinu krycího skla. Po nanesení kapaliny však ke smáčení vzorku docházelo až ve chvíli, kdy bylo krycí sklo svrchu zatíženo závažím a vlákenná vrstva tak mohla přilnout k podložnímu a krycímu sklu. Čtyři kovová závaží o stejné hmotnosti (50 g) byla umístěna do každého rohu krycího skla tak, aby zatížení vlákenné vrstvy bylo rovnoměrné a nedocházelo k ovlivnění směru smáčení. *Obr. 31* znázorňuje kapalinu nanesenou do vyvrtaného otvoru plexiskla, na kterém závaží umístěna nebyla.



*Obr. 30: Snímek použitého krycího skla s vyvrtaným otvorem*



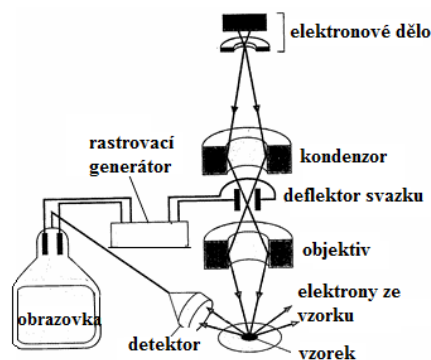
*Obr. 31: Vyvrtaný otvor s nanesenou kapalinou*

### 3.3.3 Testování smáčivosti neorientovaných vrstev s krycím sklem

Krycí sklo s kulovitým otvorem o průměru 3 mm a velikosti 3,5 x 3,5 cm bylo přiloženo na pět vzorků neorientovaných nanovlákných vrstev. Tyto vrstvy byly vyrobeny z 20% roztoku PCL a nanášením destilované vody obarvené modrým inkoustem mikropipetou byla testována jejich smáčivost povrchu. Ke smáčení vlákenné vrstvy opět došlo až v okamžiku, kdy bylo vrchní krycí sklo v rozích čtyřmi stejně těžkými (50 g) kovovými závažími zatíženo.

## 3.4 Vyhodnocení snímků elektronovým mikroskopem

Z vyrobených vzorků byly na elektronovém rastrovacím mikroskopu (SEM) (viz *obr. 32*) vytvořeny mikrosnímky, z nichž bylo později několik vybráno pro provedení stereologické metody. Preparát byl nejdříve pokryt tenkou vrstvou (7 nm) kovu (Au) a výsledný obraz na monitoru vznikl pomocí elektronového svazku, který přejížděl po povrchu vzorku a skenoval ho. Při dopadu elektronů byly z povrchu vzorku vyraženy sekundární elektrony, které byly zachyceny detektorem [33].



Obr. 32: Schéma elektronového mikroskopu [33]

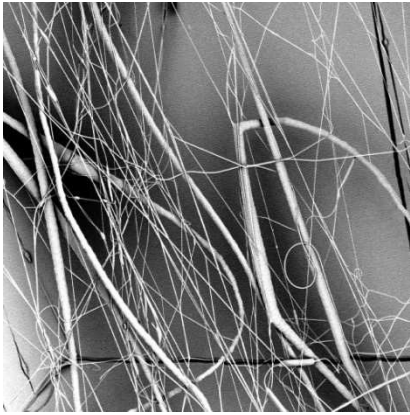
### 3.5 Popis anizotropie nanovlákných vrstev

Pro vyšetření anizotropie vyrobených vlákných vrstev byl použit odhad směrové růžice, jež byl získán grafickou metodou pomocí Steinerova kompaktu (viz kapitola 2.4). Směrová růžice neboli texturní funkce je grafické vyjádření přednostní orientace vláken [25].

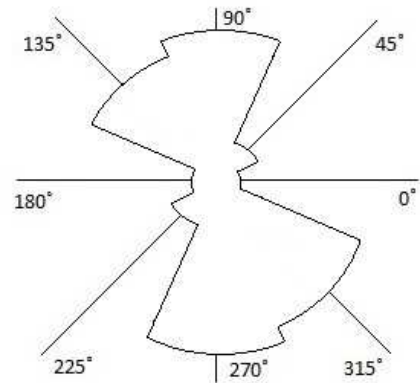
Přes nanovláknou strukturu byla nejdříve položena síť úhlů se stejně dlouhými rameny. Úhly byly v rozmezích  $0^\circ$  ( $180^\circ$ ),  $45^\circ$  ( $225^\circ$ ),  $90^\circ$  ( $270^\circ$ ) a  $135^\circ$  ( $315^\circ$ ). Dále byly spočítány průsečíky vláken se sítí úhlů v jednotlivých směrech a hodnoty počtů průsečíků byly vyneseny do nové sítě úhlů neboli polárního diagramu s pootočením o  $90^\circ$ . Následně byly v koncových bodech průsečíkové růžice vztyčeny kolmice, které vymezipily v rovině mnohoúhelník, jež se nazývá Steinerův kompakt. Nakonec byly vzdálenosti vrcholů mnohoúhelníku v souhlasném směru se směry stran Steinerova kompaktu přeneseny do nově vytvořené sítě úhlů, čímž vznikla směrová růžice. V daném snímku nám tato texturní funkce ukazuje orientaci vláken.

Ze snímků na *obr. 33* a *obr. 35* je patrné, že vybrané struktury připravených nanovlákných vrstev, které byly později použity pro testování, jsou orientované. Tuto skutečnost také potvrzují následně z těchto struktur vytvořené směrové růžice na *obr. 34* a *obr. 36*. Anizotropní charakter má podle odhadu směrové růžice (viz *obr. 38*) nanovlákná vrstva zobrazená na *obr. 37*.

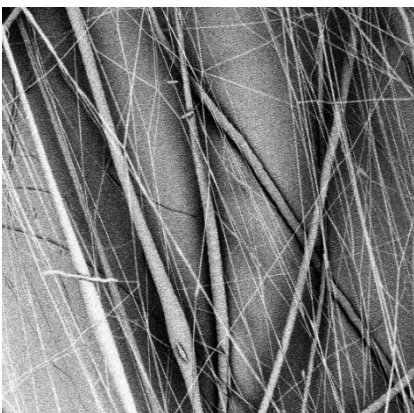




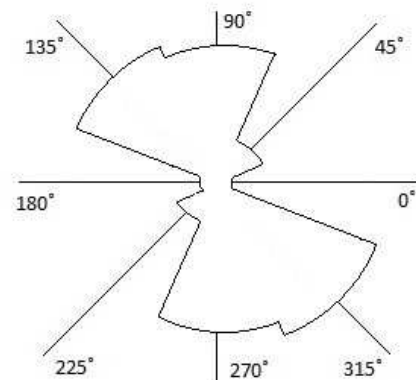
Obr. 33: Vstupní obraz směrové analýzy připravené vrstvy testované bez krycího skla



Obr. 34: Směrová růžice připravené orientované vrstvy testované bez krycího skla



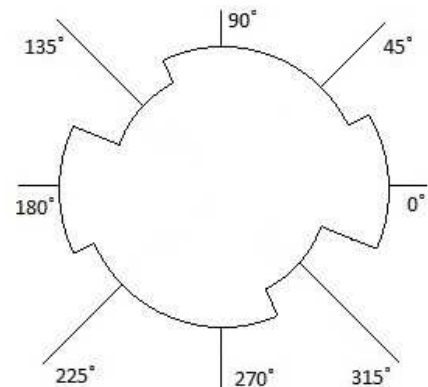
Obr. 35: Vstupní obraz směrové analýzy připravené vrstvy testované s krycím sklem



Obr. 36: Směrová růžice připravené orientované vrstvy testované s krycím sklem



Obr. 37: Vstupní obraz směrové analýzy připravené vrstvy testované s krycím sklem



Obr. 38: Směrová růžice připravené neorientované vrstvy testované s krycím sklem

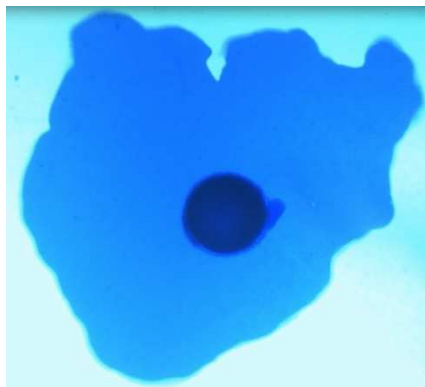
### 3.6 Výsledky měření

V této kapitole jsou naměřená data vyhodnocena. Množství nanesené kapaliny mikropipetou na povrch nanovlákněné vrstvy však při jednotlivých experimentech nebylo konstantní, proto z naměřených velikostí kapek každého vzorku není možné



stanovit průměrné hodnoty ani směrodatnou odchylku. Jednotlivé *obr.*, *tab.* a *grafy* všech měření jsou uvedeny v přílohách A - C.

Pro porovnání smáčení s vláknennou vrstvou a bez ní byl pořízen snímek kapaliny (viz *obr.* 39) nanesené do štěrbinu krycího skla, kdy na podložním sklu nanovláknenná vrstva umístěna nebyla. Ze snímku je patrné, že ke smáčení docházelo rovnoměrně.



*Obr. 39: Kapalina nanesená mezi podložní a krycí sklo*

### 3.6.1 Smáčení orientované nanovláknenné vrstvy bez krycího skla

Postup testování smáčení nanovláknenné vrstvy bez použití krycího skla popisuje kapitola 3.3.1. V *tab.* 2 jsou uvedeny hodnoty, o kolik se kapka rozprostřela po uplynutí určité doby. Veličina  $\bar{x}$  značí průměrnou velikost rozprostření kapky v procentech všech pěti vzorků v určitém odklonění od osy vláken ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ). Rozptýlení hodnot kolem průměrné hodnoty je vyjádřeno směrodatnou odchylkou  $s$ .

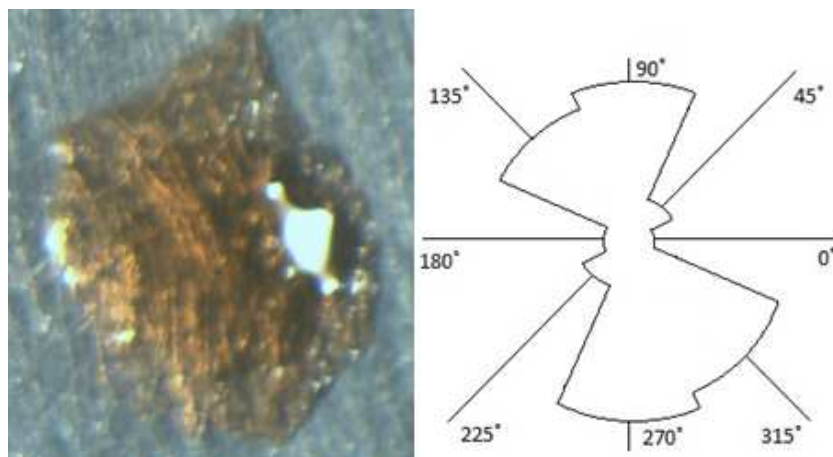
Z dat uvedených v tabulce je patrné, že při porovnání směrů smáčení odkloněných od osy vláken o  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  a  $135^\circ$  k výrazným rozdílům ve velikostech rozprostření kapek nedošlo. Největší změna byla zaznamenána u vzorku č. 1 znázorněném na *obr.* 40, kde se kapka ve směru osy vláken ( $0^\circ$ ) rozprostřela až o 47 % původní velikosti, a odhad směrové růžice potvrzuje, že tato testovaná nanovláknenná vrstva má izotropní charakter. Průměrné hodnoty získané z procentuálních hodnot velikostí rozprostřených kapek při odkloněních od osy vláken o  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  a  $135^\circ$  mohou naznačovat, že orientace struktury nanovláknenné vrstvy by mohla mít na směr smáčení materiálu také vliv.

V některých případech byla na vzorcích zaznamenána i neobvyklá chování kapalin (viz *obr.* 41), kdy na smáčení měla zřejmě také vliv nerovnoměrnost povrchu vzorku.

Tab. 2: Velikosti rozprostření kapky v různých směrech

Vzorek č.	Velikosti rozprostření kapky vzhledem k odklonění od osy vláken o							
	0°		45°		90°		135°	
	[mm]	[%]	[mm]	[%]	[mm]	[%]	[mm]	[%]
1	2,97	47	1,08	18	1,48	26	1,77	31
2	1	16	0,71	11	1,03	20	0,84	14
3	0,77	19	1,01	36	0,22	7	0,5	11
4	2,06	18	1,07	9	1,21	12	1,03	10
5	1,84	22	1,58	21	0,35	5	0,12	2
$\bar{x}$		24		19		14		14
$s$		11,5		9,6		7,9		9,6

V příloze A jsou k těmto pěti vzorkům uvedeny obr. (obr. A. 1 – obr. A. 10), grafy (graf A. 1 – graf A. 10) a tab. (tab. A. 1 – tab. A. 5) zachycující chování kapaliny v určitých časových úsecích.



Obr. 40: Kapka nanesená na vzorek č. 1 po 15 s a směrová růžice dané vrstvy



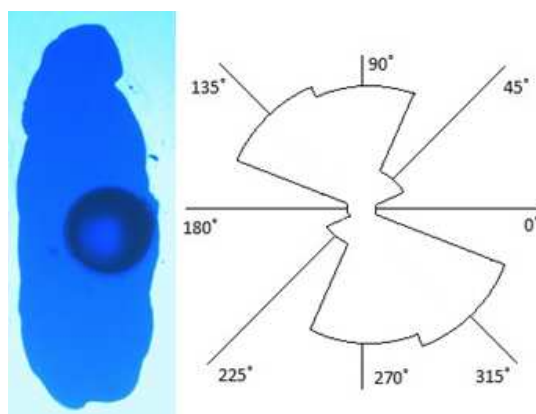
Obr. 41: Chování nanesené kapaliny na vzorku č. 5 po 40 s

### 3.6.2 Smáčení orientované nanovlákněné vrstvy s krycím sklem

Kapitola 3.3.2 popisuje experiment testující smáčení na vzorcích orientované nanovlákněné vrstvy s použitím krycího skla. Z procentuálních hodnot velikostí rozprostření v *tab. 3* je vidět, že k rozprostření kapek ve směru osy vláken ( $0^\circ$ ) došlo až pětkrát oproti původní velikosti kapek, zatímco v ostatních směrech nebyla změna tak výrazná. Byly stanoveny i průměrné hodnoty rozprostření kapek  $\bar{x}$  a směrodatné odchylky  $s$  při odkloněních od osy vláken o  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  a  $135^\circ$ . Největší rozprostření bylo naměřeno u vzorku č. 4 jak ve směru osy vláken ( $0^\circ$ ), tak i při odklonění o  $135^\circ$ . Další velmi výrazné rozprostření kapky bylo zachyceno u vzorku č. 2, který je zobrazen na *obr. 42* společně se směrovou růžicí dané vrstvy, jenž dokazuje, že upřednostňovaný směr smáčení skutečně odpovídá orientaci vláken ve struktuře.

*Tab. 3: Velikosti rozprostření kapky v různých směrech*

Vzorek č.	Velikosti rozprostření kapky vzhledem k odklonění od osy vláken $\alpha$							
	$0^\circ$		$45^\circ$		$90^\circ$		$135^\circ$	
	[mm]	[%]	[mm]	[%]	[mm]	[%]	[mm]	[%]
<b>1</b>	11,57	386	3,02	101	6,52	217	3,34	111
<b>2</b>	12,22	407	2,67	89	2,28	76	3,36	112
<b>3</b>	11,5	383	6,19	206	6,86	229	9,09	303
<b>4</b>	15,54	518	9,02	301	8	267	14,38	479
<b>5</b>	11,17	372	7,61	354	7,56	252	7,43	247
$\bar{x}$		<b>413</b>		<b>210</b>		<b>208</b>		<b>250</b>
$s$		<b>53,6</b>		<b>105,4</b>		<b>68,4</b>		<b>136,8</b>



*Obr. 42: Kapka nanosená na vzorek č. 2 po 25 s a směrová růžice dané vrstvy*

Ve srovnání s předchozím experimentem popsaném v kapitole 3.6.1 docházelo při testování smáčení nanovlákněné vrstvy s použitím krycího skla k distribuci tekutiny ve směru osy vláken ( $0^\circ$ ) výraznější a vznikaly nepravidelné linie smáčení blížící se elipse.

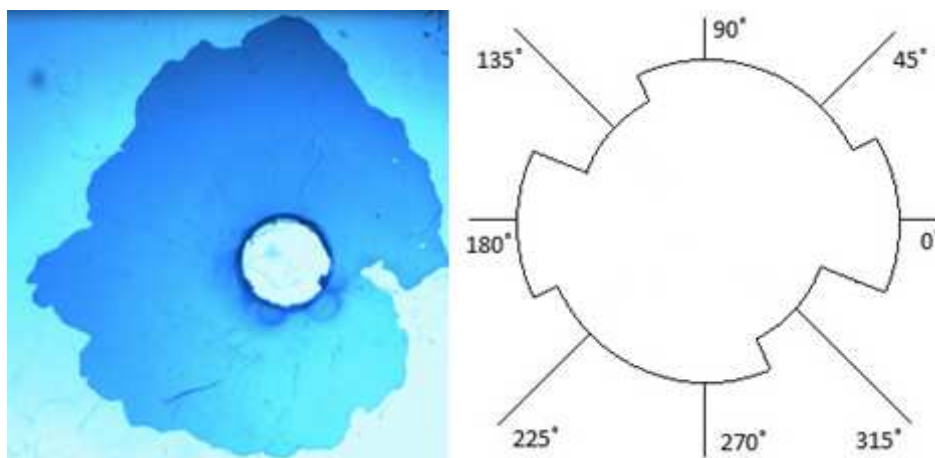
V příloze B je uvedeno pět vzorků, na nichž bylo testování smáčení provedeno. K těmto pěti vzorkům orientované nanovlákněné vrstvy jsou přiloženy *tab. (tab. B. 6 – tab. B. 10)*, *obr. (obr. B. 11 – obr. B. 20)* a *grafy (graf B. 11 – graf B. 20)* zachycující, kterým směrem kapalina prostupuje s preferencí.

### 3.6.3 Smáčení neorientované nanovlákněné vrstvy s krycím sklem

Smáčení neorientované nanovlákněné vrstvy s použitím krycího skla popisuje kapitola 3.3.3. Z *obr. 43* znázorňujícího odhad směrové růžice je patrné, že struktura vzorku č. 1, která byla použita pro testování s krycím sklem, má anizotropní charakter s náhodnou orientací vláken a k rozložení distribuované tekutiny docházelo poměrně rovnoměrně. Podle *tab. 4* jsou vypočítané průměrné hodnoty rozprostření kapek  $\bar{x}$  ve všech směrech odkloněných od osy vláken ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ) velmi podobné. Veličina  $s$  popisuje rozptyl hodnot kolem průměrné hodnoty, tj. směrodatnou odchylku.

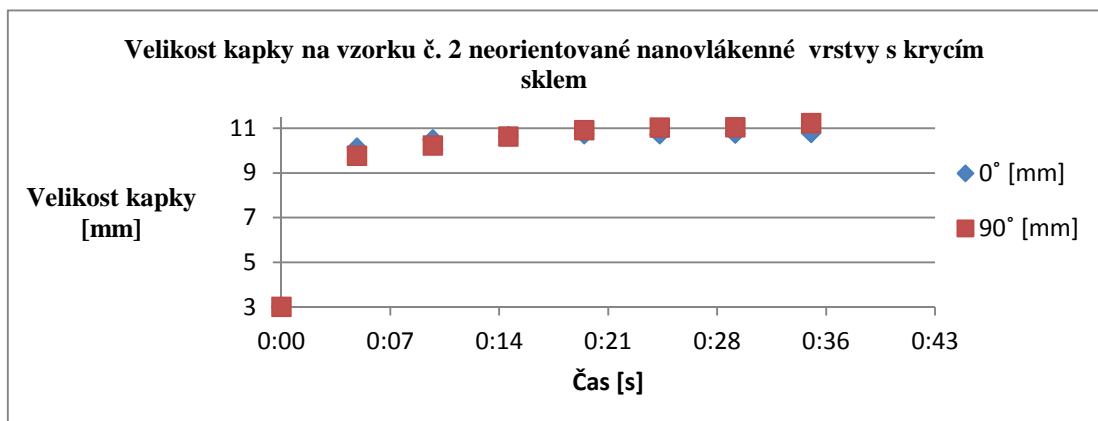
Tab. 4: Velikosti rozprostření kapky v různých směrech

Vzorek č.	Velikosti rozprostření kapky vzhledem k odklonění od osy vláken $\theta$							
	$0^\circ$		$45^\circ$		$90^\circ$		$135^\circ$	
	[mm]	[%]	[mm]	[%]	[mm]	[%]	[mm]	[%]
<b>1</b>	12,31	410	10,48	349	10,52	351	10,07	436
<b>2</b>	7,78	259	7,63	354	8,23	274	8,62	387
<b>3</b>	8,31	277	6,61	320	6,82	327	5,62	191
<b>4</b>	6,34	211	7,49	250	7,32	244	5,43	181
<b>5</b>	9,02	301	6,23	208	8,51	284	8,91	297
$\bar{x}$		<b>292</b>		<b>296</b>		<b>296</b>		<b>298</b>
$s$		<b>66,2</b>		<b>57,6</b>		<b>38,3</b>		<b>102,1</b>

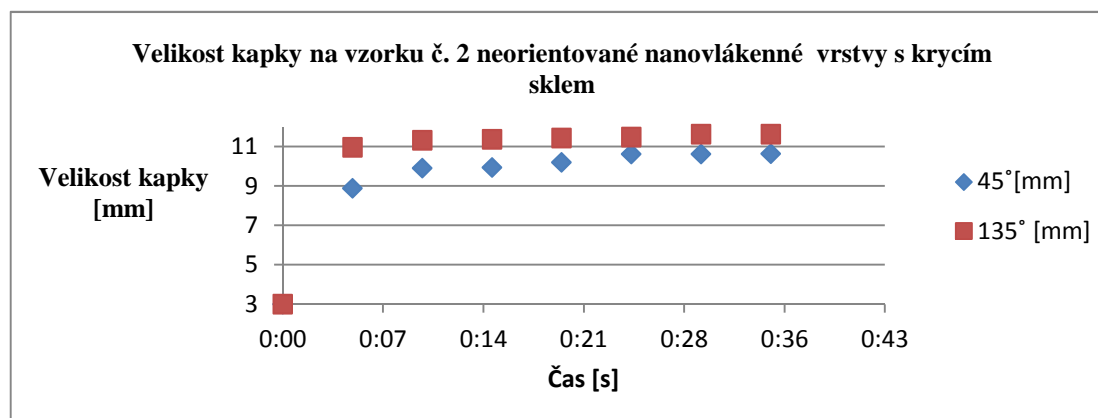


Obr. 43: Kapka nanesená na vzorek č. 1 po 30 s a směrová růžice dané vrstvy

Porovnáme-li v tabulce mezi sebou hodnoty prostupu kapaliny ve směrech odklonění, jež jsou na sebe kolmé ( $0^\circ$  a  $90^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $135^\circ$ ), tak zjistíme, že nanosená kapalina se v těchto směrech chová velmi podobně. Tento jev lze vidět na grafických zobrazeních (viz *graf 1* a *graf 2*) vzorku č. 2.



*Graf 1: Časová závislost velikosti kapky na vzorku č. 2 neorientované nanovlákněné vrstvy s krycím sklem vzhledem k odklonění od osy vláken o  $0^\circ$  a  $90^\circ$*



*Graf 2: Časová závislost velikosti kapky na vzorku č. 2 neorientované nanovlákněné vrstvy s krycím sklem vzhledem k odklonění od osy vláken o  $45^\circ$  a  $135^\circ$*

V příloze C jsou uvedeny *obr.* pěti vzorků (*obr. C. 21* – *obr. C. 30*) zachycující kapalinu právě nanosenou na vrstvu a její postup po určitém časovém úseku. Společně se snímky jsou přiloženy i *tab.* (*tab. C. 11* – *tab. C. 15*) a *grafy* (*graf C. 21* – *graf C. 30*) naměřených hodnot velikostí kapek.

## 4 Závěr

V teoretické části práce byly shrnuty základní pojmy a postupy týkající se elektrostatického zvlákňování, smáčení a vzlínání kapaliny a následně bylo popsáno vyhodnocení anizotropie rovinných vlákných systémů pomocí odhadu směrové růžice. V závěru teoretické části jsou uvedena některá již použitá zařízení pro výrobu orientovaných nanovlákných vrstev a také práce Korneva et al., kteří se zabývali problematikou vzlínání kapalin do nanovlákněné příze.

Cílem experimentální části práce bylo vyrobit vzorky nanovlákných vrstev, jejichž vlákna jsou orientovaná nebo náhodně uspořádaná, a analyzovat vliv struktury vrstvy na proces smáčení. K výrobě vzorků byl použit polymer polykaprolakton, z něhož připravené roztoky byly následně elektrostaticky zvlákňovány z jehly. V případě vrstvy s orientovanými vlákny sloužily jako kolektor paralelně umístěné elektrody, mezi něž byla vlákna zachytávána napříč. Byly vyrobeny i neorientované vrstvy pro posouzení vlivu struktury na proces smáčení. Postup výroby těchto neorientovaných vrstev byl velmi obdobný, avšak jako kolektor sloužila mřížka.

Experimentální část práce byla v první fázi zaměřena na měření kontaktního úhlu smáčení neorientovaných vrstev, na jejichž povrchu byl měřen úhel přisedlé kapky destilované vody. Z naměřených hodnot je patrné, že povrch PCL vrstvy je nesmáčivý a s rostoucí koncentrací roztoku dochází ke snižování kontaktního úhlu.

Podářilo se vypracovat metodiku pro sledování rozdílů rozprostření kapaliny v různých směrech v závislosti na orientaci vláken ve struktuře. Vzorky neorientovaných nanovlákných vrstev vykazují rovnoměrnost do všech směrů, ve tvaru blízkém kruhu. Zatímco u orientovaných nanovlákných vrstev byla zaznamenána větší nerovnoměrnost distribuce tekutiny, jejíž plocha má tvary blízké elipse protáhlé ve směru os vláken.

Srovnáme-li výsledky smáčení orientované nanovlákněné vrstvy s použitím krycího skla a bez použití krycího skla, tak zjistíme, že při smáčení vrstvy s krycím sklem docházelo ve směru osy vláken k distribuci tekutiny daleko výraznější než při smáčení vrstvy bez použití krycího skla. Dále bylo zjištěno, že správné umístění nanovlákněné vrstvy na desku plexiskla může také velmi výrazně ovlivnit výsledky. Po nanesení kapaliny totiž ke smáčení vzorku docházelo až ve chvíli, kdy bylo krycí sklo svrchu

zatíženo závažím a vlákenná vrstva se dotýkala jak podložního, tak i krycího skla. Stanovení optimální koncentrace inkoustu v destilované vodě se pro tyto experimenty ukázalo být také velmi důležité. Protože inkoust mění povrchové napětí, tak se kapky s menším množstvím inkoustu na nanovlákně vrstvě jeví jako těžko smáčitelné. Po přidání většího množství inkoustu do vody došlo k výraznějšímu snížení povrchového napětí a tím i k lepšímu smáčení povrchu vláken. Je tedy nutné věnovat se i jiným charakteristikám experimentu, které by mohly mít vliv na pronikání kapek v závislosti na struktuře nanovlákně vrstvy.

Z naměřených výsledků vyplývá, že jeden z velmi důležitých faktorů ovlivňující pronikání kapek do struktur nanovlákně vrstev je orientace vláken. Tyto výsledné hodnoty jsou shrnuty do tabulek a grafů a společně se snímky zobrazeny v přílohách.

Následně byl také ze snímků elektronového rastrovacího mikroskopu proveden odhad směrové růžice připravených vrstev, který dokázal, že upřednostňovaný směr smáčení skutečně odpovídá orientaci vláken ve struktuře. Potvrdil se tedy předpoklad souvislosti naměřených hodnot rozprostřených kapek s orientací vláken.

Výše uvedené skutečnosti dávají na problematiku smáčení nanovlákně vrstev nový náhled. Výsledky této práce by mohly sloužit k dalšímu průzkumu. Vliv orientace struktury je potřeba prostudovat hlouběji, avšak naměřené výsledky ukazují, že proces vzlínání v nanovlákně materiálech by predikovat možné bylo. Vypracovaná metodika pro vzlínání kapaliny do struktur nanovlákně vrstev je jednoduchá, avšak časově velmi náročná. Pro získání věrohodných výsledků je nutno provést statistiku z velkého počtu měření. Velikou výhodou je možnost vrátit se při nesrovnalostech k opakovanému měření, jelikož videozáznamy pronikajících kapek zůstávají uloženy.

Při zpracování bakalářské práce se naskytly otázky či problémy, které by mohly inspirovat náměty dalších prací, např.:

- Pronikání kapky sledovat pomocí dvou kamer. Vrchní kamera by zaznamenávala rozprostření kapky svrchu a spodní kamera by sledovala, zda dochází ke smáčení stejné plochy i zespodu.
- Pro experimenty použít nanovlákně vrstvy o stejné koncentraci polymerního roztoku, stanovit optimální koncentraci barvicí látky ve vodném roztoku a dávkovat stejně objemné kapky.
- Provést analýzu drsnosti povrchu nanovlákně vrstvy a také stanovit její poróznost.

## 5 Literatura

- [1] LUKÁŠ, David. *Materiálové inženýrství netkaných textilií*. Technická Univerzita v Liberci, 2003.
- [2] RAMAKRISHNA, Seeram. *An introduction to electrospinning and nanofibers*. Hackensack, NJ: World Scientific, c2005, xi, 382 p.
- [3] ZIABARI, M., V. MOTTAGHITALAB a A. K. HAGHI. Application of direct tracking method for measuring electrospun nanofiber diameter. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. [Online] 2009. [Citace: 10. 10. 2015.] Dostupné z: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-66322009000100006](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-66322009000100006).
- [4] WOODRUFF, Maria Ann a Dietmar Werner HUTMACHER. The return of a forgotten polymer—Polycaprolactone in the 21st century. *Progress in Polymer Science* [online]. 2010 [cit. 2015-11-14]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079670010000419>.
- [5] Polycaprolactone (PCL). *Make It From* [online]. [cit. 2015-10-05]. Dostupné z: <http://www.makeitfrom.com/material-properties/Polycaprolactone-PCL/>.
- [6] DAI, Weifeng, et al. Synthesis, characterization and degradability of the comb-type poly(4-hydroxyl- $\epsilon$ -caprolactone-co- $\epsilon$ -caprolactone)-g-poly(l-lactide). *European Polymer Journal* [online]. 2009 [cit. 2015-10-05]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0014305709001177>.
- [7]  $\epsilon$ -Caprolactone. *Sigma - Aldrich*. [Online] [Citace: 5. 10. 2015.] Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/704067?lang=en&region=CZ>.
- [8] Polycaprolactone. *Sigma - Aldrich*. [Online] [Citace: 5. 10. 2015.] Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/440752?lang=en&region=CZ>.
- [9] Chloroform. *PubChem*. [Online] [Citace: 5. 10. 2015.] Dostupné z: <http://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/chloroform#section=Top>.
- [10] Ethanol. *Info Pleas*. [Online] [Citace: 5. 10. 2015.] Dostupné z: <http://www.infoplease.com/encyclopedia/science/ethanol-properties.html>.
- [11] Representing Organic Structures. *The University of Sydney*. [Online] [Citace: 5. 10. 2015.] Dostupné z: [https://scilearn.sydney.edu.au/fychemistry/prelab/organic\\_structures.shtml](https://scilearn.sydney.edu.au/fychemistry/prelab/organic_structures.shtml).
- [12] PubChem. *Distilled water*. [Online] [Citace: 6. 10. 2015.] <http://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/water#section=2D-Structure>.



- [13] EDITED BY S.J. RUSSELL. *Handbook of nonwovens*. Boca Raton, Fla. [etc.] : Cambridge: CRC press ; Woodhead, 2007. ISBN 9781855736030.
- [14] HORÁK, Zdeněk a František KRUPKA. Fyzika. 3. vyd. Praha: SNTL, 1981.
- [15] Surface Tension. *Tutor Vista*. [Online] [Citace: 8. 10. 2015.]  
<http://physics.tutorvista.com/fluid-dynamics/surface-tension.html>.
- [16] PEŤKOVÁ, Gabriela. Smáčení netkaných textilií podporované aplikací ultrazvuku, diplomová práce Technické univerzity v Liberci. 2006.
- [17] Povrchové napětí. *Encyklopedie fyziky*. [Online] [Citace: 8. 10. 2015.]  
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/641-povrchove-napeti>.
- [18] ŠMIDRKAL, Jan. Tenzidy a detergenty dnes, *Chemické listy* 93, 421-427, 1999.
- [19] BORMASHENKO, Edward. Progress in understanding wetting transitions on rough surfaces. *Advances in Colloid and Interface Science*. [Online] 2014. [Citace: 7. 10. 2015.] Dostupné z:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001868614000530>.
- [20] GENNES, Pierre-Gilles de, Françoise BROCHARD-WYART a David QUÉRÉ. *Capillarity and wetting phenomena: drops, bubbles, pearls, waves*. New York: Springer, c2004, xv, 291 p. ISBN 0387005927.
- [21] Kohezní tlak. [Online] [Citace: 9. 10. 2015.]  
<http://artemis.osu.cz/molfs/MOLFS1.pdf>.
- [22] SVOBODA, Emanuel. *Přehled středoškolské fyziky*. 4., upr. vyd. Praha: Prometheus, 2005, 531 s., [12] obr. barev. příl. ISBN 80-7196-307-0.
- [23] CHALOUPEK, Jiří. *Smáčení vlákných útvarů*, disertační práce Technické univerzity v Liberci. 2007.
- [24] LUKÁŠ, David. *Teorie netkaných textilií*, Technická Univerzita v Liberci, 1999.
- [25] LUKÁŠ, David. *Stereologie textilních materiálů*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 1999, 80 s. ISBN 80-7083-362-9.
- [26] DOERGENSA, et al. Identifying key processing parameters for the electrospinning of aligned polymer nanofibers. *Materials Letters*. [Online] 2014. [Citace: 8. 8. 2015.] Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167577X14019508>.
- [27] LIAO, Guiying, et al. Electrospun aligned PLLA/PCL/HA composite fibrous membranes and their in vitro degradation behaviors. *Materials Letters*. [Online] 2012. [Citace: 28. 10. 2015.] Dostupné z:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167577X1200763X>.

- [28] ARRAS, Matthias M. L., et al. Electrospinning of aligned fibers. *Science and Technology of Advanced Materials*. [Online] 2012. [Citace: 29. 9. 2015.] Dostupné z: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1468-6996/13/3/035008/pdf;jsessionid=30DB6BA5E69873187B98A8FCFF0BE86A.c1>.
- [29] BEACHLEY, Vince a Wen, Xuejun. Effect of electrospinning parameters on the nanofiber diameter and length. *Materials Science and Engineering*. [Online] 2009. [Citace: 9. 8. 2015.] Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0928493108003226>.
- [30] CHEN, Mei-Chin, Yu-Chin SUN a Yuan-Hsiang CHEN. Electrically conductive nanofibers with highly oriented structures and their potential application in skeletal muscle tissue engineering. *Acta Biomaterialia*. [Online] 2013. [Citace: 30. 9. 2015.] Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1742706112005016>.
- [31] KORNEV, Konstantin G., Yu GU a Chen-Chih TSAI. Wetting of nanofiber yarns. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. [Online] 2014. [Citace: 19. 10. 2015.] Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927775714005834>.
- [32] GREPLOVÁ, Jarmila. Charakterizace funkcionalizovaných vláken pro jejich osídlení mezenchymálními kmenovými buňkami a diferenciaci těchto buněk, diplomová práce Univerzity Krlovovy v Praze. 2011.
- [33] Nebuněčné formy života, elektronové mikroskopy. *Biologie a genetika pro bakaláře*. [Online] [Citace: 17. 10. 2015.] Dostupné z: [http://mmp.vfu.cz/opvk2014/?title=teorie-nebunecne\\_formy\\_zivota&lang=cz](http://mmp.vfu.cz/opvk2014/?title=teorie-nebunecne_formy_zivota&lang=cz).

## 6 Seznam obrázků, grafů a tabulek

<i>Obr. 1: Schéma principu elektrostatického zvlákňování [3]</i> .....	9
<i>Obr. 2: Chemická struktura <math>\varepsilon</math>-kaprolaktonu [7]</i> .....	11
<i>Obr. 3: Chemická struktura PCL [8]</i> .....	11
<i>Obr. 4: Strukturní vzorec chloroformu [9]</i> .....	11
<i>Obr. 5: Strukturní vzorec ethanolu [11]</i> .....	11
<i>Obr. 6: Strukturní vzorec vody [12]</i> .....	12
<i>Obr. 7: Listy pohybující se na vodní hladině [15]</i> .....	13
<i>Obr. 8: Drátěný rámeček s pohyblivým raménkem [16]</i> .....	13
<i>Obr. 9: Grafické zobrazení úhlu smáčení [16]</i> .....	14
<i>Obr. 10: Povrchová vrstva kapaliny [21]</i> .....	15
<i>Obr. 11: Vypuklý (konvexní) a vydutý (konkávní) povrch kapaliny [17]</i> .....	15
<i>Obr. 12: Určení kapilárního tlaku pod zakřiveným povrchem kapaliny [16]</i> .....	16
<i>Obr. 13: Kapilární elevace (a) a deprese (b) [23]</i> .....	16
<i>Obr. 14: Kapilára vnořená do kapaliny s přirozenou hladinou a meniskem [20]</i> .....	18
<i>Obr. 15: Níť a intervaly úhlů [25]</i> .....	19
<i>Obr. 16: Rozdělení nitě na malé rovné úseky pro určení anizotropie [25]</i> .....	20
<i>Obr. 17: Sít' úhlů se stejně dlouhými rameny</i> .....	20
<i>Obr. 18: Průřez vláken se studovanou vlákennou strukturou [25]</i> .....	20
<i>Obr. 19: Steinerův kompakt [25]</i> .....	21
<i>Obr. 20: Odhad směrové růžice <math>f(\beta)</math></i> .....	21
<i>Obr. 21: Rotační válcový kolektor z drátků [26]</i> .....	22
<i>Obr. 22: Kolektor se dvěma pomocnými elektrodami [28]</i> .....	22
<i>Obr. 23: Schéma zařízení pro hodnocení vztlínání kapaliny do příže [31]</i> .....	24
<i>Obr. 24: Tvar kapaliny po vnoření příže [31]</i> .....	24
<i>Obr. 25: Snímek kolektoru typu paralelní elektrody</i> .....	26
<i>Obr. 26: Snímek použitého kolektoru s více paralelními elektrodami</i> .....	26
<i>Obr. 27: Snímek kolektoru typu mřížka</i> .....	26
<i>Obr. 28: Schéma uspořádání experimentu při testování smáčivosti [19]</i> .....	27
<i>Obr. 29: Odklonění od osy vláken [32]</i> .....	27
<i>Obr. 30: Snímek použitého krycího skla s vyvrtaným otvorem</i> .....	29
<i>Obr. 31: Vyvrtaný otvor s nanesenou kapalinou</i> .....	29
<i>Obr. 32: Schéma elektronového mikroskopu [33]</i> .....	30

<i>Obr. 33: Vstupní obraz směrové analýzy připravené vrstvy testované bez krycího skla</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 34: Směrová růžice připravené orientované vrstvy testované bez krycího skla.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 35: Vstupní obraz směrové analýzy připravené vrstvy testované s krycím sklem..</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 36: Směrová růžice připravené orientované vrstvy testované s krycím sklem.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 37: Vstupní obraz směrové analýzy připravené vrstvy testované s krycím sklem..</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 38: Směrová růžice připravené neorientované vrstvy testované s krycím sklem ...</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 39: Kapalina nanesená mezi podložní a krycí sklo .....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 40: Kapka nanesená na vzorek č. 1 po 15 s a směrová růžice dané vrstvy.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 41: Chování nanesené kapaliny na vzorku č. 5 po 40 s .....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 42: Kapka nanesená na vzorek č. 2 po 25 s a směrová růžice dané vrstvy.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 43: Kapka nanesená na vzorek č. 1 po 30 s a směrová růžice dané vrstvy.....</i>	<i>35</i>
<i>Graf 1: Časová závislost velikosti kapky na vzorku č. 2 neorientované nanovláčkové vrstvy s krycím sklem vzhledem k odklonění od osy vláken o 0° a 90° .....</i>	<i>36</i>
<i>Graf 2: Časová závislost velikosti kapky na vzorku č. 2 neorientované nanovláčkové vrstvy s krycím sklem vzhledem k odklonění od osy vláken o 45° a 135° .....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 1: Úhly smáčení vrstev v závislosti na koncentraci.....</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 2: Velikosti rozprostření kapky v různých směrech.....</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 3: Velikosti rozprostření kapky v různých směrech.....</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 4: Velikosti rozprostření kapky v různých směrech.....</i>	<i>35</i>

## 7 Seznam příloh

### Příloha A

- *Obr. (obr. A. 1 – obr. A. 10)* vzorků orientovaných nanovlákných vrstev s právě nanosenou kapalinou a po uplynutí určité smáčecí doby bez použití krycího skla
- *Tab. (tab. A. 1 – tab. A. 5)* časové závislosti velikosti kapky na povrchu orientované nanovlákné vrstvy bez použití krycího skla
- *Grafy (graf A. 1 – graf A. 10)* znázorňující průběh smáčení do struktury orientované nanovlákné vrstvy v různých směrech bez použití krycího skla

### Příloha B

- *Obr. (obr. B. 11 – obr. B. 20)* vzorků orientovaných nanovlákných vrstev s právě nanosenou kapalinou a po uplynutí určité smáčecí doby s použitím krycího skla
- *Tab. (tab. B. 6 – tab. B. 10)* časové závislosti velikosti kapky na povrchu orientované nanovlákné vrstvy za použití krycího skla
- *Grafy (graf B. 11 – graf B. 20)* znázorňující průběh smáčení do struktury orientované nanovlákné vrstvy v různých směrech za použití krycího skla

### Příloha C

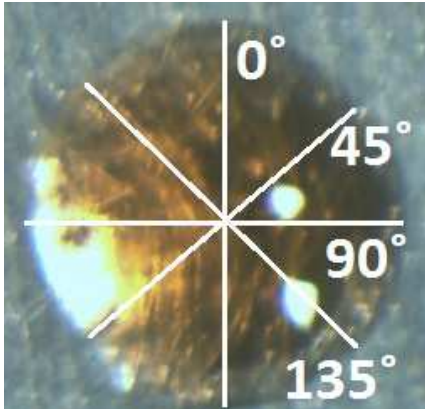
- *Obr. (obr. C. 21 – obr. C. 30)* vzorků neorientovaných nanovlákných vrstev s právě nanosenou kapalinou a po uplynutí smáčecí doby s použitím krycího skla
- *Tab. (tab. C. 11 – tab. C. 15)* časové závislosti kapky na povrchu neorientované nanovlákné vrstvy za použití krycího skla

*Grafy (graf C. 21 – graf C. 30)* znázorňující průběh smáčení do struktury neorientované nanovlákné vrstvy v různých směrech za použití krycího skla

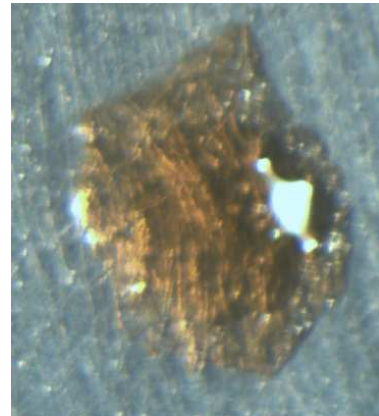
## Příloha A

### Testování orientované nanovláčkové vrstvy bez krycího skla

#### Vzorek č. 1



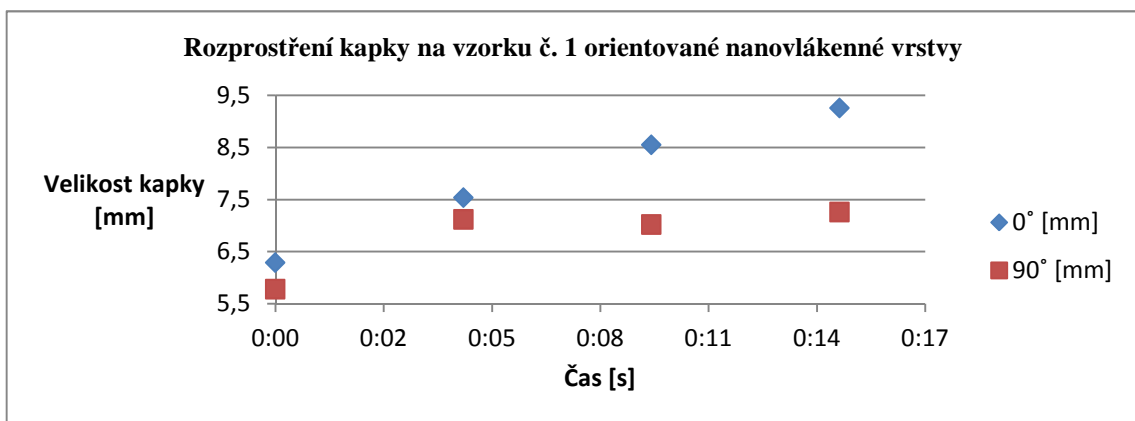
Obr. A. 1: Snímek nanosené kapaliny na vzorku č. 1 se směry smáčení



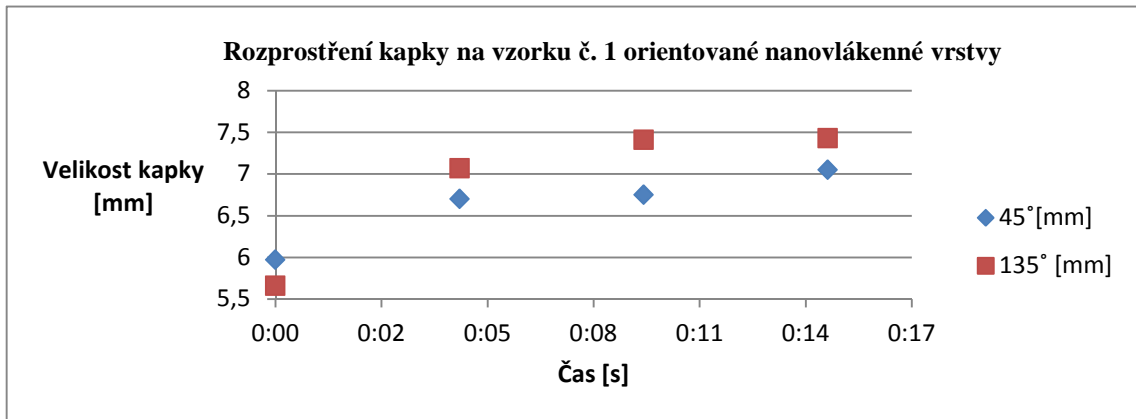
Obr. A. 2: Chování nanosené kapaliny na vzorku č. 1 po 15 s

Tab. A. 1: Směry smáčení orientované vrstvy vzhledem k odklonění od osy vláken

Vzorek č. 1	Velikost kapky [mm] v čase 15 s				Rozprostření kapky za 15 s	
čas [s]	0:00	0:05	0:10	0:15	o [mm]	o [%]
0° [mm]	6,29	7,54	8,55	9,26	<b>2,97</b>	<b>47</b>
90° [mm]	5,78	7,12	7,02	7,26	<b>1,48</b>	<b>26</b>
45° [mm]	5,97	6,7	6,75	7,05	<b>1,08</b>	<b>18</b>
135° [mm]	5,66	7,07	7,41	7,43	<b>1,77</b>	<b>31</b>

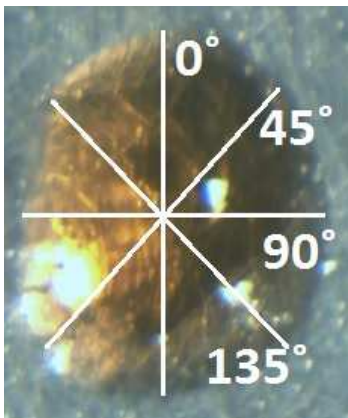


Graf A. 1: Časová závislost rozprostření kapky na vzorku č. 1 orientované nanovláčkové vrstvy bez krycího skla vzhledem k odklonění od osy vláken o 0° a 90°

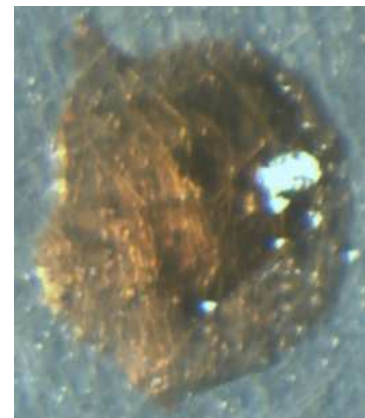


Graf A. 2: Časová závislost rozprostření kapky na vzorku č. 1 orientované nanovláčkové vrstvy bez krycího skla vzhledem k odklonění od osy vláken o 45° a 135°

Vzorek č. 2



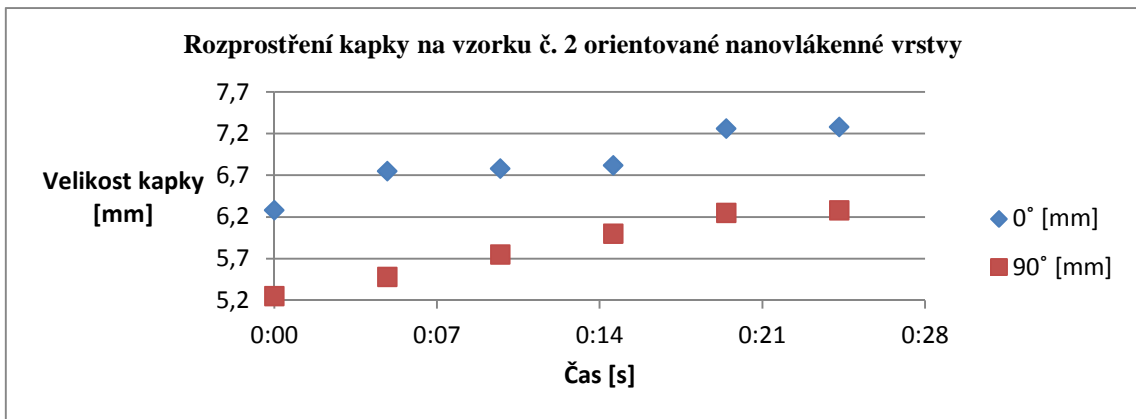
Obr. A. 3: Snímek nanosené kapaliny na vzorku č. 2 se směry smáčení



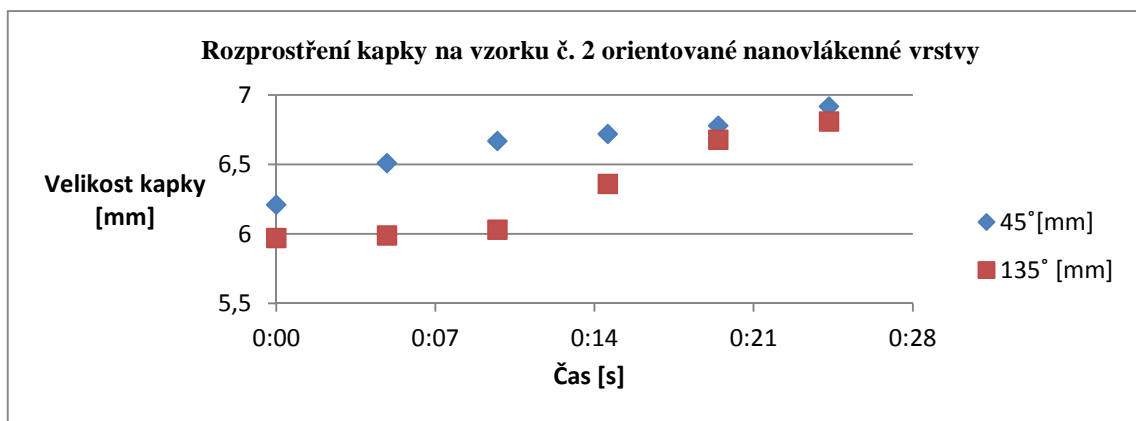
Obr. A. 4: Chování nanosené kapaliny na vzorku č. 2 po 25 s

Tab. A. 2: Směry smáčení orientované vrstvy vzhledem k odklonění od osy vláken

Vzorek č. 2 čas [s]	Velikost kapky [mm] v čase 25 s						Rozprostření kapky za 25 s	
	0:00	0:05	0:10	0:15	0:20	0:25	o [mm]	o [%]
0° [mm]	6,28	6,75	6,78	6,82	7,26	7,28	1	16
90° [mm]	5,25	5,48	5,75	6	6,25	6,28	1,03	20
45° [mm]	6,21	6,51	6,67	6,72	6,78	6,92	0,71	11
135° [mm]	5,97	5,99	6,03	6,36	6,68	6,81	0,84	14

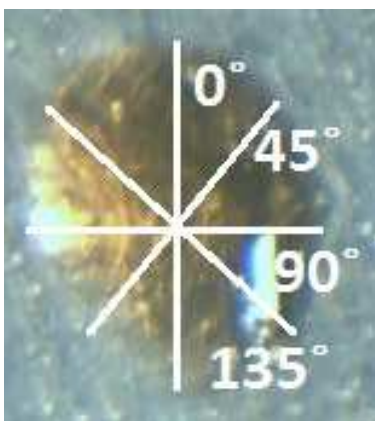


Graf A. 3: Časová závislost rozprostření kapky na vzorku č. 2 orientované nanovláčkové vrstvy bez krycího skla vzhledem k odklonění od osy vláken o 0° a 90°

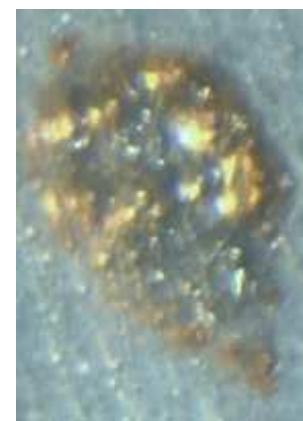


Graf A. 4: Časová závislost rozprostření kapky na vzorku č. 2 orientované nanovláčkové vrstvy bez krycího skla vzhledem k odklonění od osy vláken o 45° a 135°

**Vzorek č. 3**



Obr. A. 5: Snímek nanosené kapaliny na vzorku č. 3 se směry smáčení

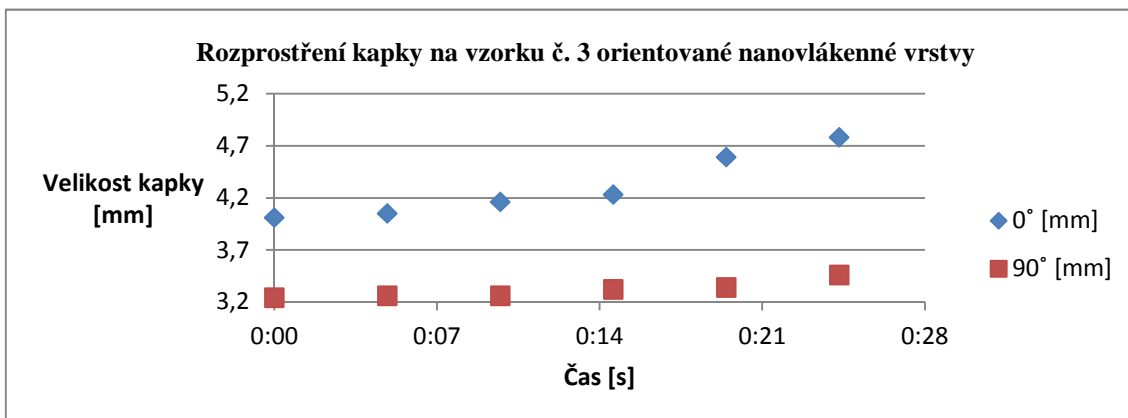


Obr. A. 6: Chování nanosené kapaliny na vzorku č. 3 po 25 s

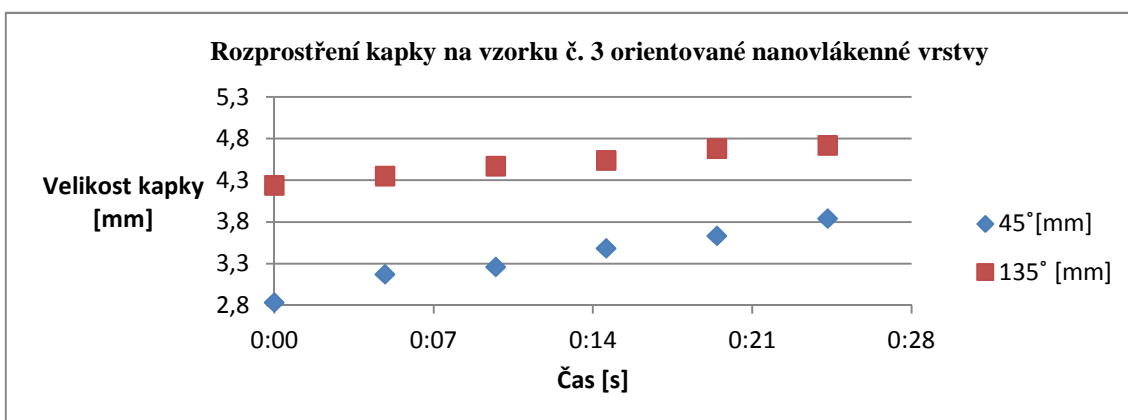


Tab. A. 3: Směry smáčení orientované vrstvy vzhledem k odklonění od osy vláken

Vzorek č. 3	Velikost kapky [mm] v čase 25 s						Rozprostření kapky za 25 s	
čas [s]	0:00	0:05	0:10	0:15	0:20	0:25	o [mm]	o [%]
0° [mm]	4,01	4,05	4,16	4,23	4,59	4,78	0,77	19
90° [mm]	3,24	3,26	3,26	3,32	3,34	3,46	0,22	7
45° [mm]	2,83	3,17	3,26	3,48	3,63	3,84	1,01	36
135° [mm]	4,24	4,35	4,47	4,54	4,68	4,72	0,5	11

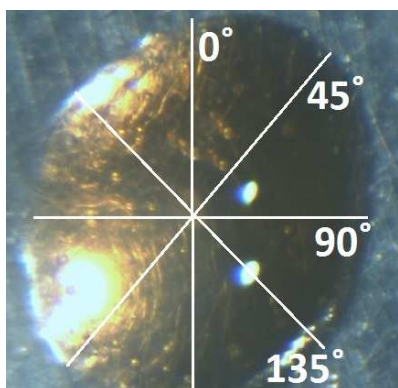


Graf A. 5: Časová závislost rozprostření kapky na vzorku č. 3 orientované nanovláčkové vrstvy bez krycího skla vzhledem k odklonění od osy vláken o 0° a 90°

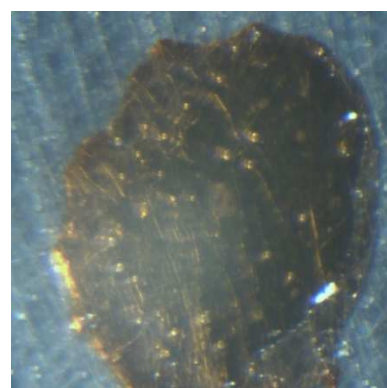


Graf A. 6: Časová závislost rozprostření kapky na vzorku č. 3 orientované nanovláčkové vrstvy bez krycího skla vzhledem k odklonění od osy vláken o 45° a 135°

Vzorek č. 4



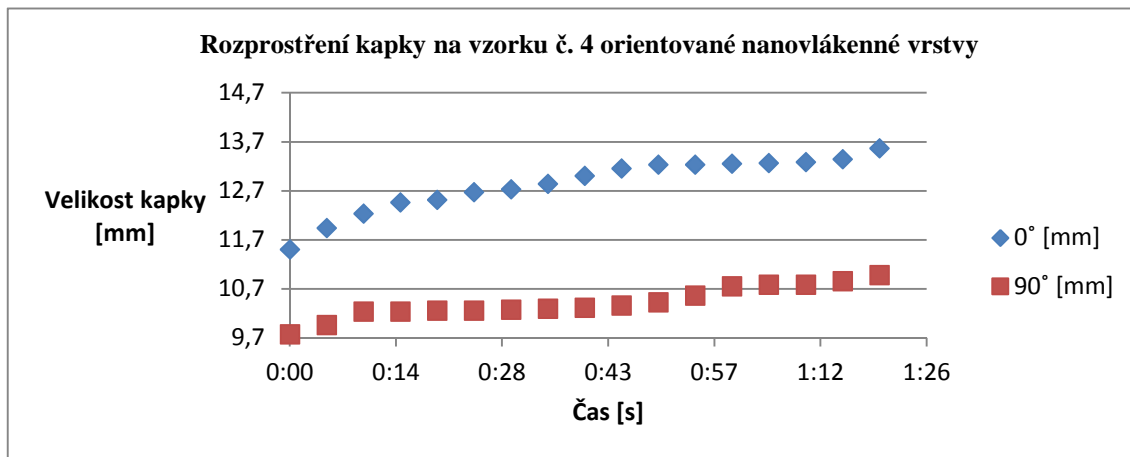
Obr. A. 7: Snímek nanosené kapaliny na vzorku č. 4 se směry smáčení



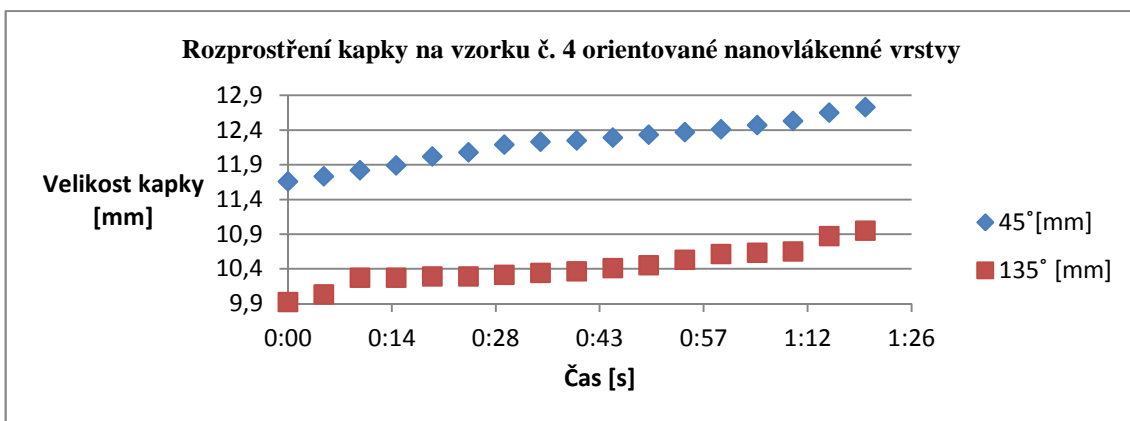
Obr. A. 8: Chování nanosené kapaliny na vzorku č. 4 po 80 s

Tab. A. 4: Směry smáčení orientované vrstvy vzhledem k odklonění od osy vláken

Vzorek č. 4	Velikost kapky [mm] v čase 80 s									Rozprostření kapky za 80 s		
	čas [s]	0:00	0:10	0:20	0:30	0:40	0:50	1:00	1:10	1:20	$\theta$ [mm]	$\theta$ [%]
0° [mm]		11,5	12,23	12,51	12,73	13,0	13,23	13,25	13,28	13,56	2,06	18
90° [mm]		9,77	10,23	10,25	10,27	10,31	10,42	10,75	10,78	10,98	1,21	12
45° [mm]		11,66	11,82	12,02	12,19	12,25	12,33	12,41	12,53	12,73	1,07	9
135° [mm]		9,92	10,27	10,29	10,31	10,36	10,45	10,61	10,65	10,95	1,03	10

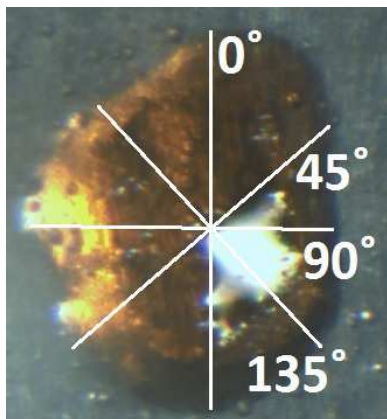


Graf A. 7: Časová závislost rozprostření kapky na vzorku č. 4 orientované nanovláčkové vrstvy bez krycího skla vzhledem k odklonění od osy vláken o 0° a 90°

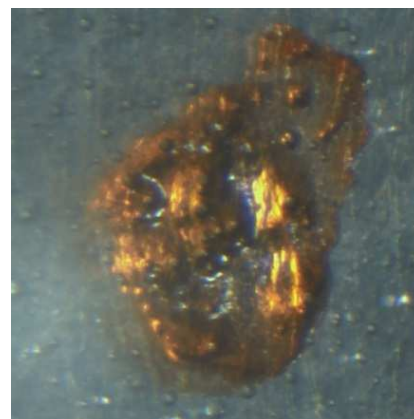


Graf A. 8: Časová závislost rozprostření kapky na vzorku č. 4 orientované nanovláčkové vrstvy bez krycího skla vzhledem k odklonění od osy vláken o 45° a 135°

Vzorek č. 5



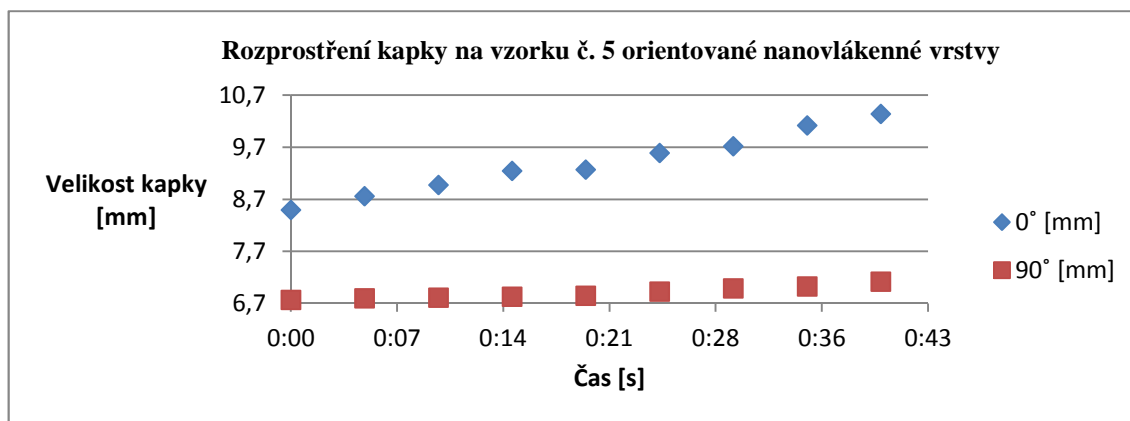
Obr. A. 9: Snímek nanosené kapaliny na vzorku č. 5 se směry smáčení



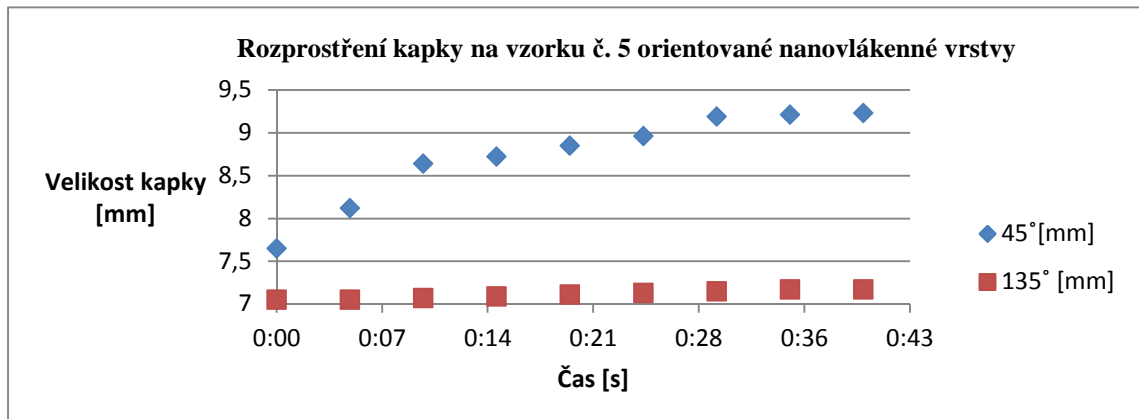
Obr. A. 10: Chování nanosené kapaliny na vzorku č. 5 po 40 s

Tab. A. 5: Směry smáčení orientované vrstvy vzhledem k odklonění od osy vláken

Vzorek č. 5	Velikost kapky [mm] v čase 40 s									Rozprostření kapky za 40 s		
	čas [s]	0:00	0:05	0:10	0:15	0:20	0:25	0:30	0:35	0:40	o [mm]	o [%]
0° [mm]		8,5	8,76	8,98	9,25	9,27	9,59	9,72	10,12	10,34	1,84	22
90° [mm]		6,77	6,8	6,81	6,83	6,85	6,93	6,99	7,03	7,12	0,35	5
45° [mm]		7,65	8,12	8,64	8,72	8,85	8,96	9,19	9,21	9,23	1,58	21
135° [mm]		7,05	7,05	7,07	7,09	7,11	7,13	7,15	7,17	7,17	0,12	2



Graf A. 9: Časová závislost rozprostření kapky na vzorku č. 5 orientované nanovláčkové vrstvy bez krycího skla vzhledem k odklonění od osy vláken o 0° a 90°

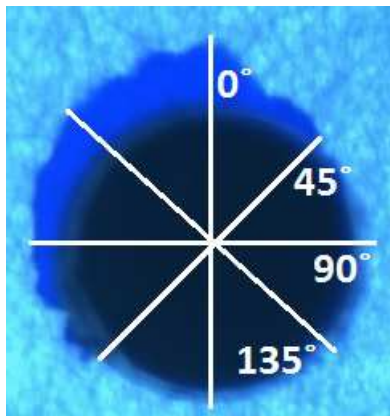


Graf A. 10: Časová závislost rozprostření kapky na vzorku č. 5 orientované nanovláčkové vrstvy bez krycího skla vzhledem k odklonění od osy vláken o 45° a 135°

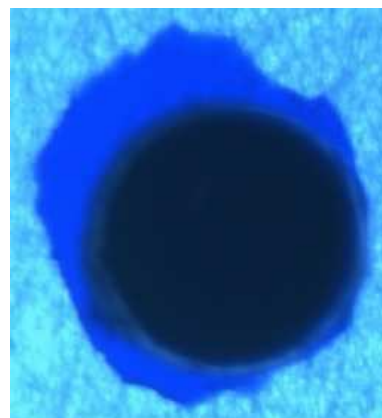
## Příloha B

### Testování orientované nanovlákněné vrstvy s krycím sklem

#### Vzorek č. 1



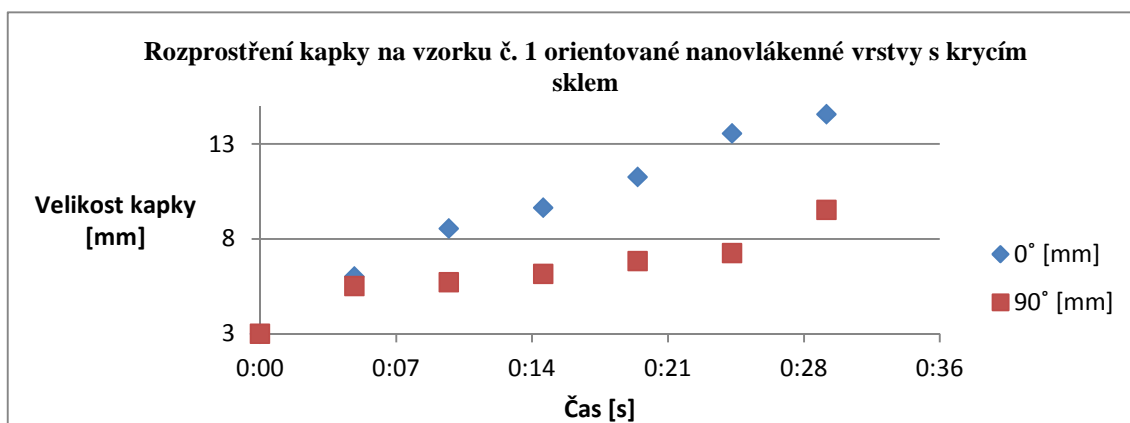
Obr. B. 1: Snímek po nanesení kapaliny na vzorek č. 1 se směry smáčení



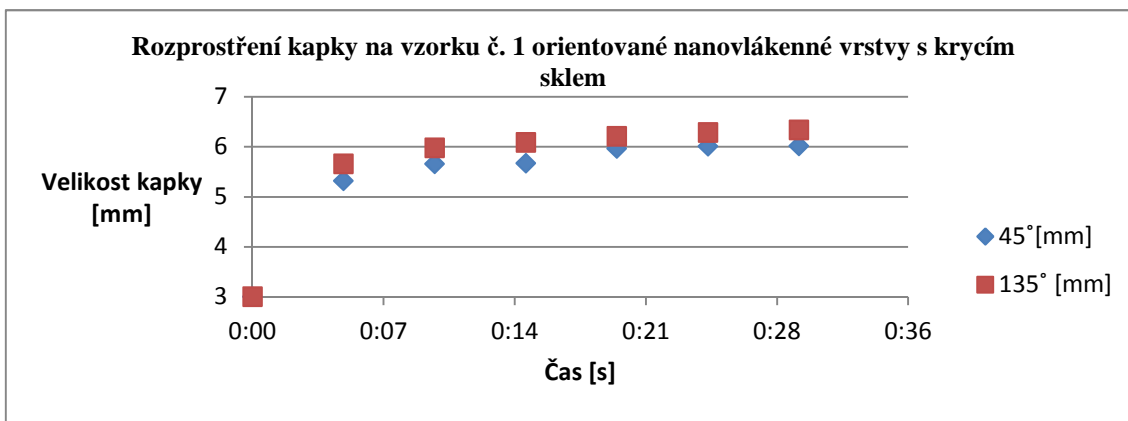
Obr. B. 2: Chování nanesené kapaliny na vzorku č. 1 po 30 s

Tab. B. 1: Směry smáčení orientované vrstvy vzhledem k odklonění od osy vláken

Vzorek č. 1	Velikost kapky [mm] v čase 30 s							Rozprostření kapky za 30 s		
	čas [s]	0:00	0:05	0:10	0:15	0:20	0:25	0:30	o [mm]	o [%]
0° [mm]		3	6,02	8,54	9,65	11,26	13,56	14,57	<b>11,57</b>	<b>386</b>
90° [mm]		3	5,51	5,72	6,15	6,83	7,25	9,52	<b>6,52</b>	<b>217</b>
45° [mm]		3	5,32	5,66	5,67	5,97	6,01	6,02	<b>3,02</b>	<b>101</b>
135° [mm]		3	5,66	5,98	6,09	6,21	6,29	6,34	<b>3,34</b>	<b>111</b>



Graf B. 1: Časová závislost rozprostření kapky na vzorku č. 1 orientované nanovlákněné vrstvy s krycím sklem vzhledem k odklonění od osy vláken o 0° a 90°

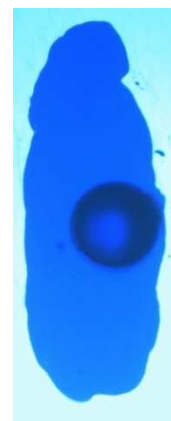


Graf B. 2: Časová závislost rozptřeni kapky na vzorku č. 1 orientované nanovlákněné vrstvy s krycím sklem vzhledem k odklonění od osy vláken o 45° a 135°

Vzorek č. 2



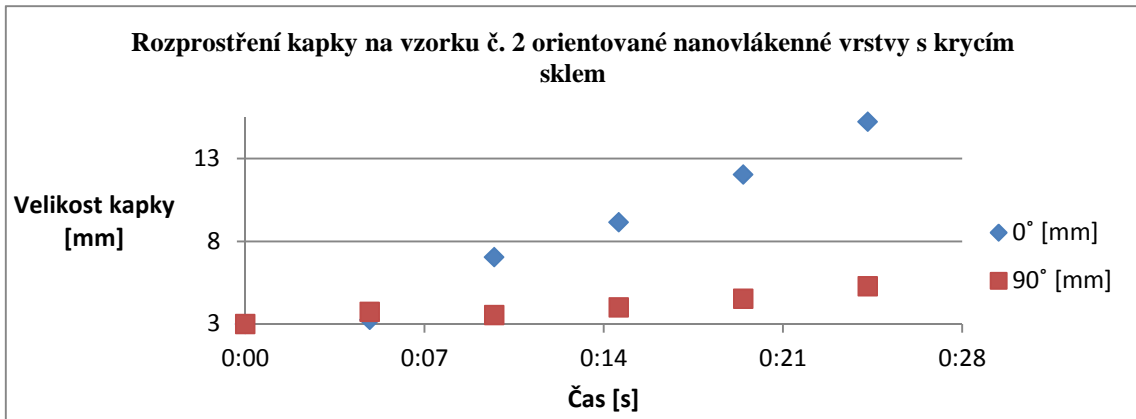
Obr. B. 3: Snímek po nanosení kapaliny na vzorek č. 2 se směry smáčení



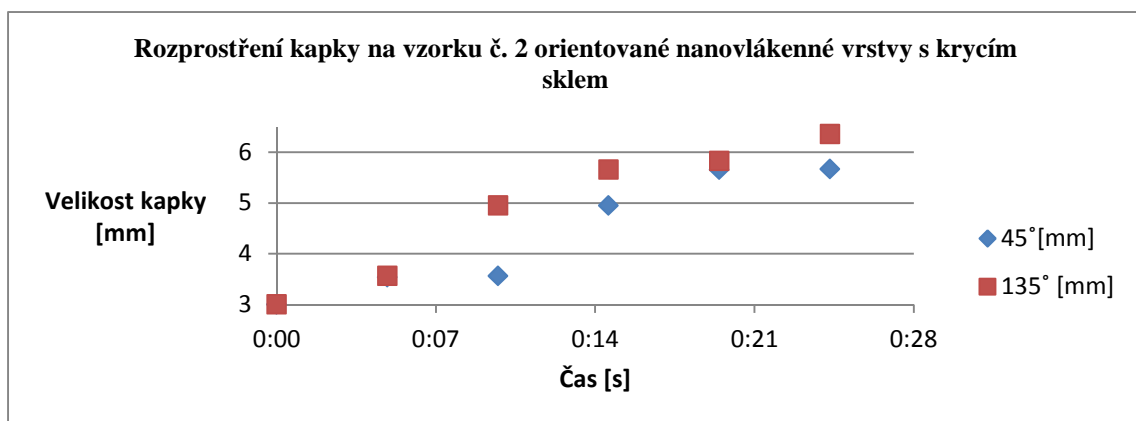
Obr. B. 4: Chování nanosené kapaliny na vzorku č. 2 po 25 s

Tab. B. 2: Směry smáčení orientované vrstvy vzhledem k odklonění od osy vláken

Vzorek č. 2 čas [s]	Velikost kapky [mm] v čase 25 s						Rozptřeni kapky za 25 s	
	0:00	0:05	0:10	0:15	0:20	0:25	o [mm]	o [%]
0° [mm]	3	3,24	7,03	9,15	12,02	15,22	12,22	407
90° [mm]	3	3,74	3,54	4	4,53	5,28	2,28	76
45° [mm]	3	3,54	3,56	4,95	5,66	5,67	2,67	89
135° [mm]	3	3,56	4,95	5,66	5,83	6,36	3,36	112

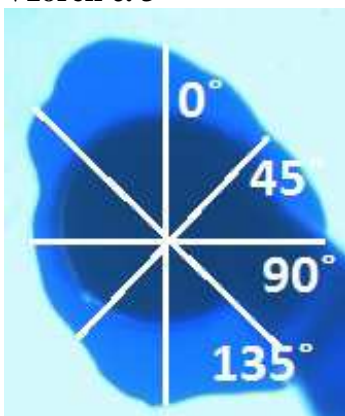


Graf B. 3: Časová závislost rozprostření kapky na vzorku č. 2 orientované nanovláčkové vrstvy s krycím sklem vzhledem k odklonění od osy vláken o 0° a 90°



Graf B. 4: Časová závislost rozprostření kapky na vzorku č. 2 orientované nanovláčkové vrstvy s krycím sklem vzhledem k odklonění od osy vláken o 45° a 135°

**Vzorek č. 3**



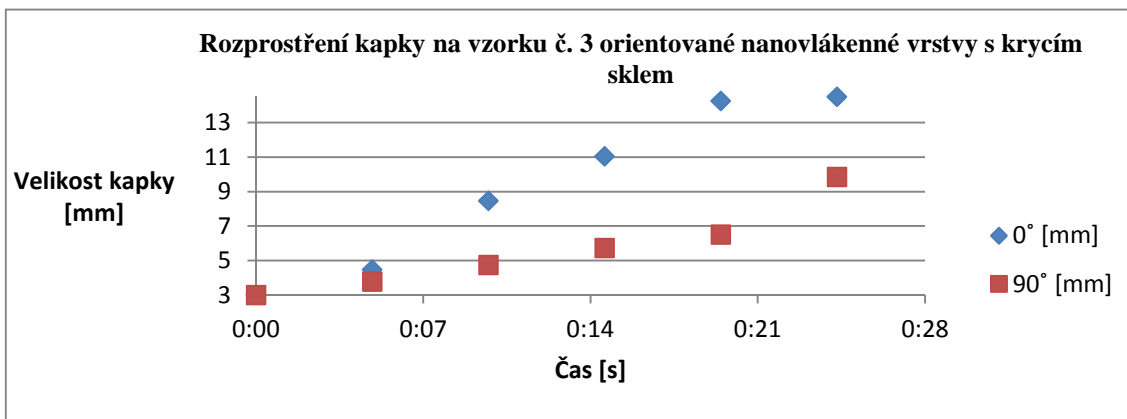
Obr. B. 5: Snímek po nanesení kapaliny na vzorek č. 3 se směry smáčení a s pipetou



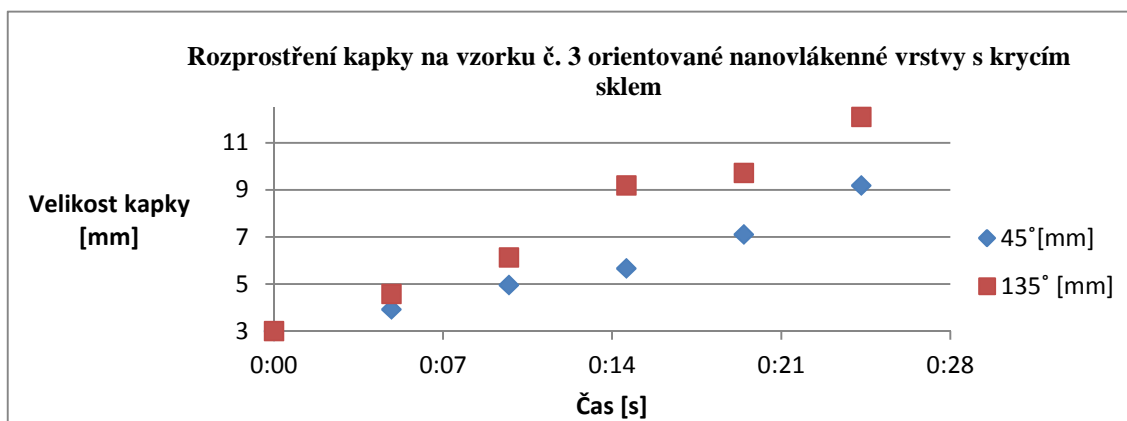
Obr. B. 6: Chování nanesené kapaliny na vzorku č. 3 po 25 s

Tab. B. 3: Směry smáčení orientované vrstvy vzhledem k odklonění od osy vláken

Vzorek č. 3	Velikost kapky [mm] v čase 25 s						Rozprostření kapky za 25 s	
	čas [s]	0:00	0:05	0:10	0:15	0:20	0:25	o [mm]
0° [mm]	3	4,48	8,46	11,05	14,26	14,5	11,5	383
90° [mm]	3	3,78	4,75	5,73	6,51	9,86	6,86	229
45° [mm]	3	3,92	4,95	5,66	7,11	9,19	6,19	206
135° [mm]	3	4,58	6,13	9,19	9,72	12,09	9,09	303



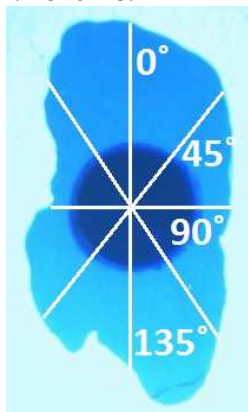
Graf B. 5: Časová závislost rozprostření kapky na vzorku č. 3 orientované nanovláčkové vrstvy s krycím sklem vzhledem k odklonění od osy vláken o 0° a 90°



Graf B. 6: Časová závislost rozprostření kapky na vzorku č. 3 orientované nanovláčkové vrstvy s krycím sklem vzhledem k odklonění od osy vláken o 45° a 135°



**Vzorek č. 4**



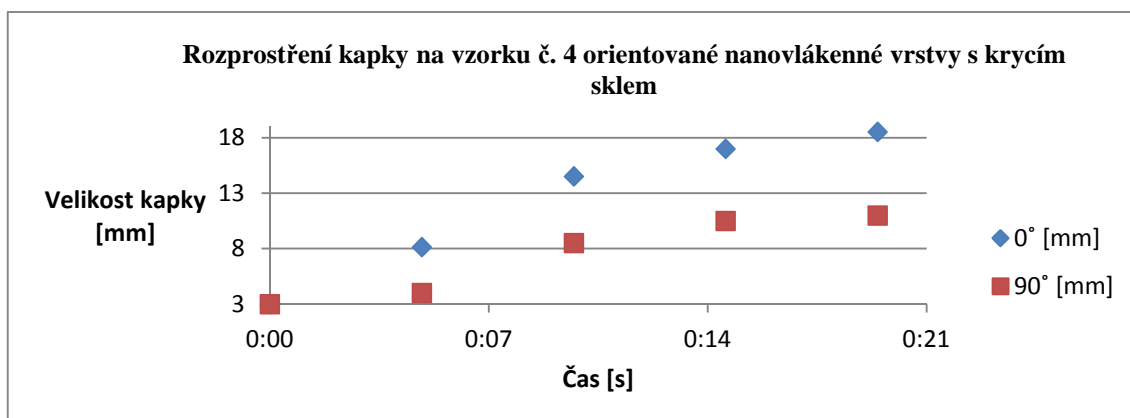
Obr. B. 7: Snímek po nanesení kapaliny na vzorek č. 4 se směry smáčení



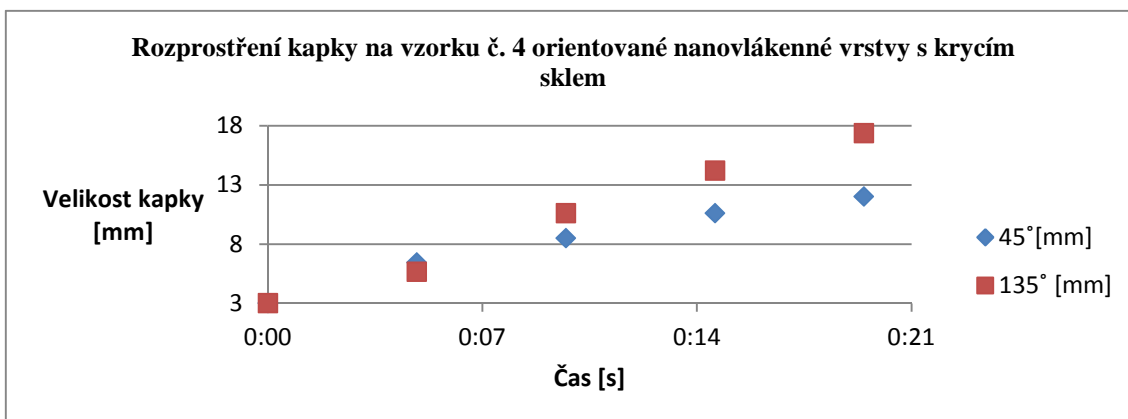
Obr. B. 8: Chování nanesené kapaliny na vzorku č. 4 po 20 s

Tab. B. 4: Směry smáčení orientované vrstvy vzhledem k odklonění od osy vláken

Vzorek č. 4	Velikost kapky [mm] v čase 20 s					Rozprostření kapky za 20 s	
	čas [s]	0:00	0:05	0:10	0:15	0:20	o [mm]
0° [mm]	3	8,15	14,52	17,01	18,54	15,54	518
90° [mm]	3	4,02	8,53	10,52	11	8	267
45° [mm]	3	6,43	8,49	10,61	12,02	9,02	301
135° [mm]	3	5,66	10,61	14,2	17,38	14,38	479

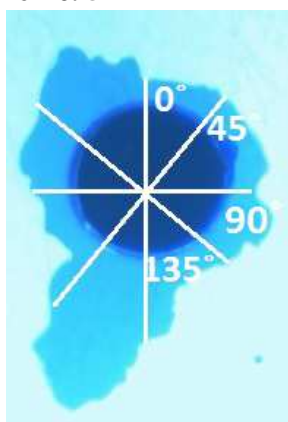


Graf B. 7: Časová závislost rozprostření kapky na vzorku č. 4 orientované nanovláčkové vrstvy s krycím sklem vzhledem k odklonění od osy vláken o 0° a 90°

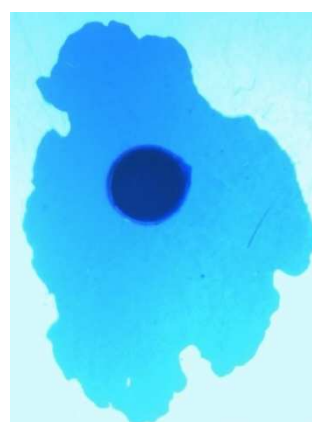


Graf B. 8: Časová závislost rozprostření kapky na vzorku č. 4 orientované nanovláčkové vrstvy s krycím sklem vzhledem k odklonění od osy vláken o 45° a 135°

### Vzorek č. 5



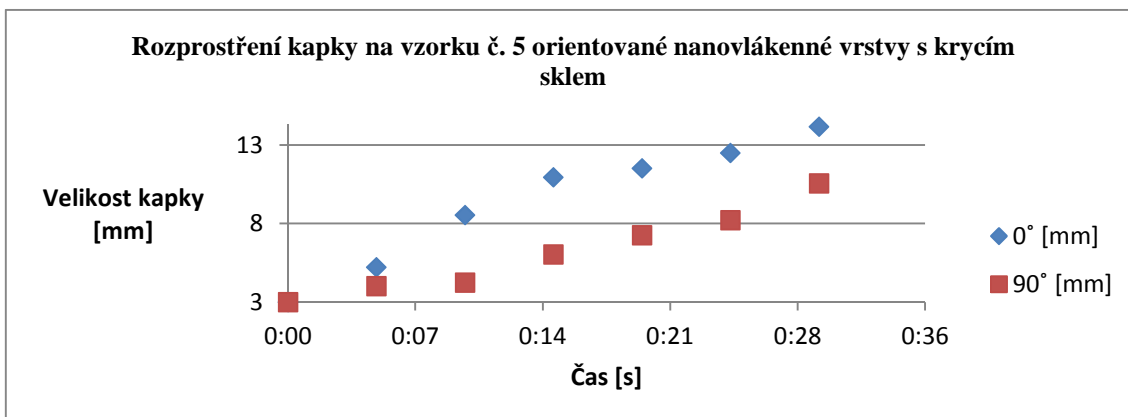
Obr. B. 9: Snímek po nanesení kapaliny na vzorek č. 5 se směry smáčení



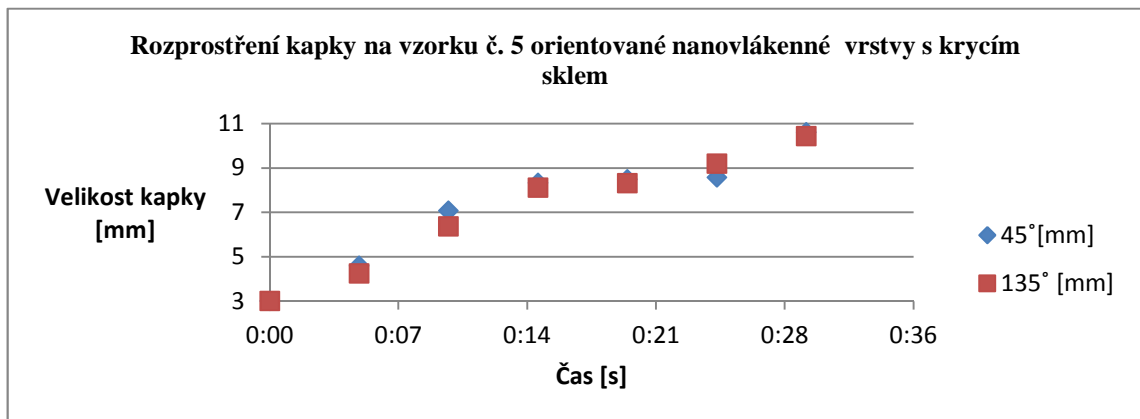
Obr. B. 10: Chování nanosené kapaliny na vzorku č. 5 po 30 s

Tab. B. 5: Směry smáčení orientované vrstvy vzhledem k odklonění od osy vláken

Vzorek č. 5	Velikost kapky [mm] v čase 30 s							Rozprostření kapky za 30 s		
	čas [s]	0:00	0:05	0:10	0:15	0:20	0:25	0:30	o [mm]	o [%]
0° [mm]		3	5,23	8,54	10,96	11,53	12,5	14,17	11,17	372
90° [mm]		3	4,02	4,25	6,04	7,26	8,23	10,56	7,56	252
45° [mm]		3	4,59	7,07	8,32	8,49	8,57	10,61	7,61	354
135° [mm]		3	4,24	6,36	8,11	8,31	9,19	10,43	7,43	247



Graf B. 9: Časová závislost rozprostření kapky na vzorku č. 5 orientované nanovláčkové vrstvy s krycím sklem vzhledem k odklonění od osy vláken o 0° a 90°

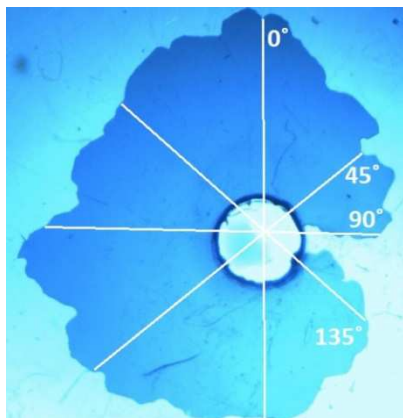


Graf B. 10: Časová závislost rozprostření kapky na vzorku č. 5 orientované nanovlákněné vrstvy s krycím sklem vzhledem k odklonění od osy vláken o  $45^\circ$  a  $135^\circ$

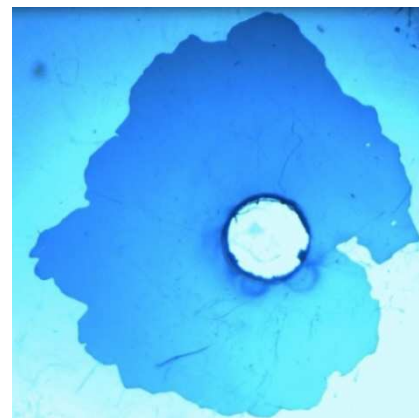
## Příloha C

### Testování neorientované nanovlákněné vrstvy s krycím sklem

#### Vzorek č. 1



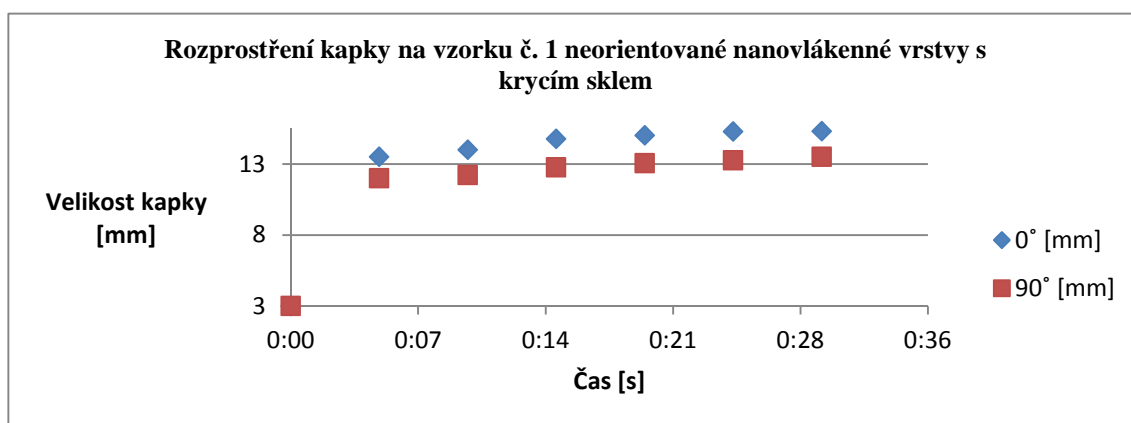
Obr. C. 1: Snímek po nanesení kapaliny na vzorek č. 1 se směry smáčení



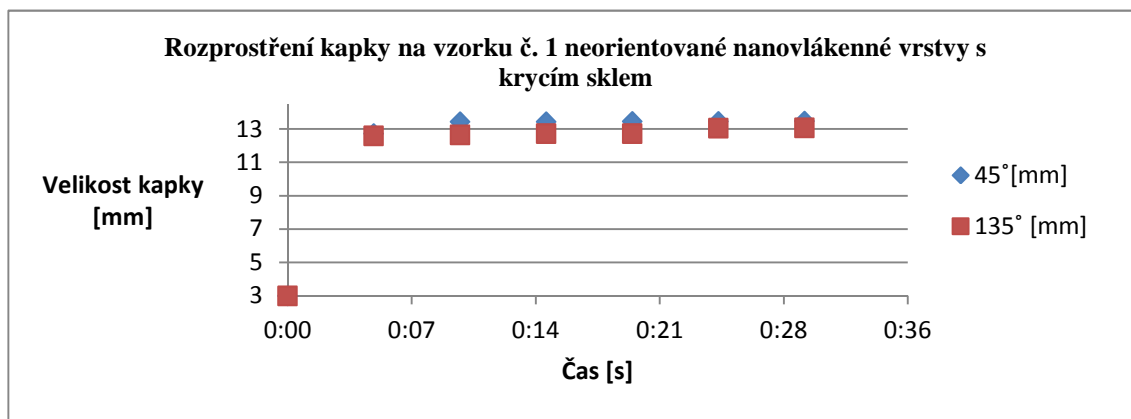
Obr. C. 2: Chování nanesené kapaliny na vzorku č. 1 po 30 s

Tab. C. 1: Směry smáčení neorientované vrstvy vzhledem k odklonění od osy vláken:

Vzorek č. 1	Velikost kapky [mm] v čase 30 s							Rozprostření kapky za 30 s		
	čas [s]	0:00	0:05	0:10	0:15	0:20	0:25	0:30	o [mm]	o [%]
0° [mm]		3	13,5	14	14,77	15,03	15,29	15,31	12,31	410
90° [mm]		3	12	12,23	12,77	13,05	13,27	13,52	10,52	351
45° [mm]		3	12,73	13,44	13,44	13,46	13,46	13,48	10,48	349
135° [mm]		3	12,58	12,64	12,73	12,73	13,05	13,07	10,07	436

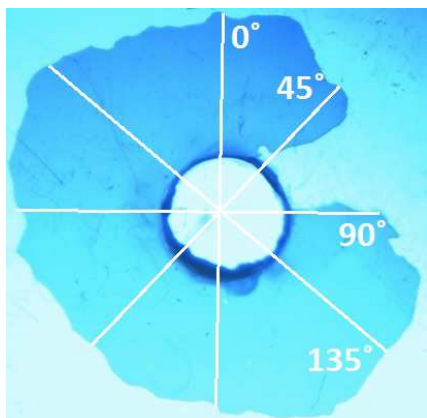


Graf C. 1: Časová závislost rozprostření kapky na vzorku č. 1 neorientované nanovlákněné vrstvy s krycím sklem vzhledem k odklonění od osy vláken o 0° a 90°

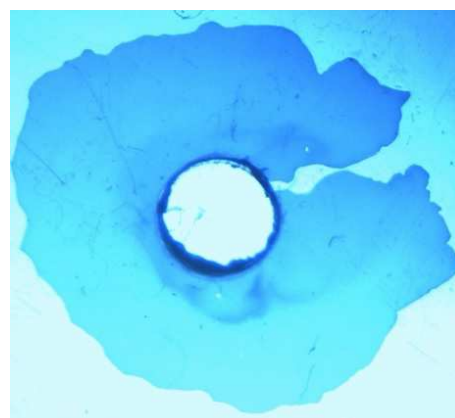


Graf C. 2: Časová závislost rozprostření kapky na vzorku č. 1 neorientované nanovlákněné vrstvy s krycím sklem vzhledem k odklonění od osy vláken o 45° a 135°

**Vzorek č. 2**



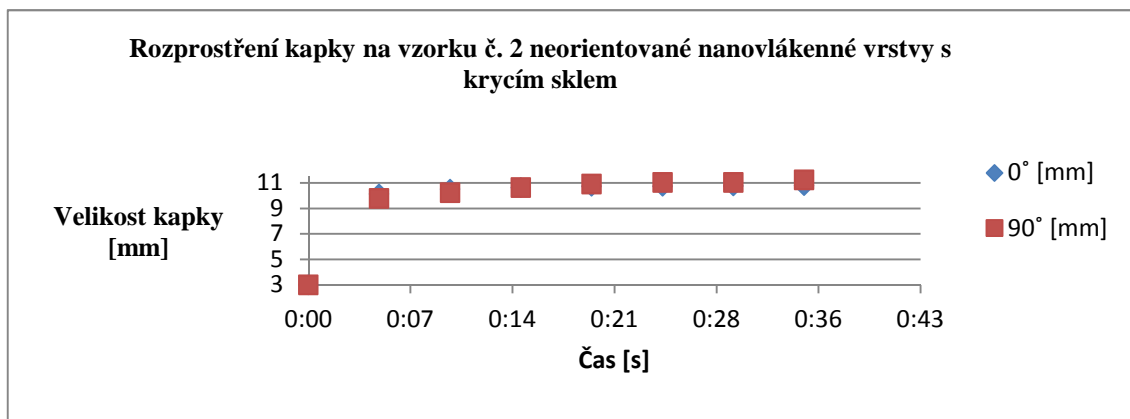
Obr. C. 3: Snímek po nanesení kapaliny na vzorek č. 2 se směry smáčení



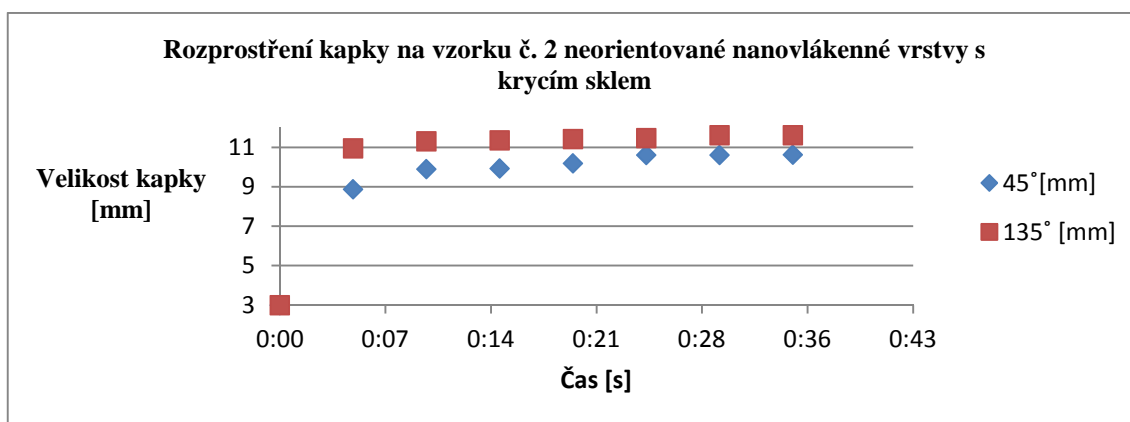
Obr. C. 4: Chování nanosené kapaliny na vzorku č. 2 po 35 s

Tab. C. 2: Směry smáčení neorientované vrstvy vzhledem k odklonění od osy vláken

Vzorek č. 2	Velikost kapky [mm] v čase 35 s								Rozprostření kapky za 35 s	
	čas [s]	0:00	0:05	0:10	0:15	0:20	0:25	0:30	0:35	o [mm]
0° [mm]	3	10,12	10,5	10,64	10,72	10,72	10,75	10,78	<b>7,78</b>	<b>259</b>
90° [mm]	3	9,77	10,23	10,63	10,91	11,03	11,04	11,23	<b>8,23</b>	<b>274</b>
45° [mm]	3	8,88	9,9	9,93	10,19	10,61	10,62	10,63	<b>7,63</b>	<b>354</b>
135° [mm]	3	10,95	11,31	11,36	11,43	11,48	11,62	11,62	<b>8,62</b>	<b>387</b>

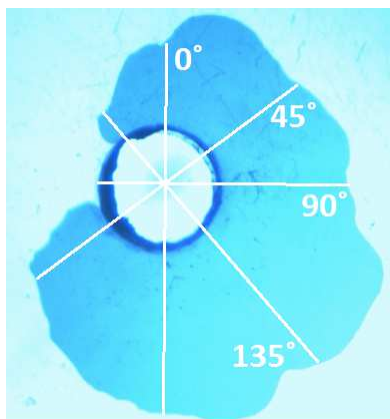


Graf C. 3: Časová závislost rozprostření kapky na vzorku č. 2 neorientované nanovlákněné vrstvy s krycím sklem vzhledem k odklonění od osy vláken o 0° a 90°

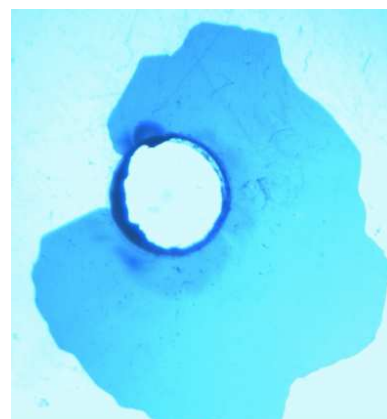


Graf C. 4: Časová závislost rozprostření kapky na vzorku č. 2 neorientované nanovlákněné vrstvy s krycím sklem vzhledem k odklonění od osy vláken o 45° a 135°

**Vzorek č. 3**



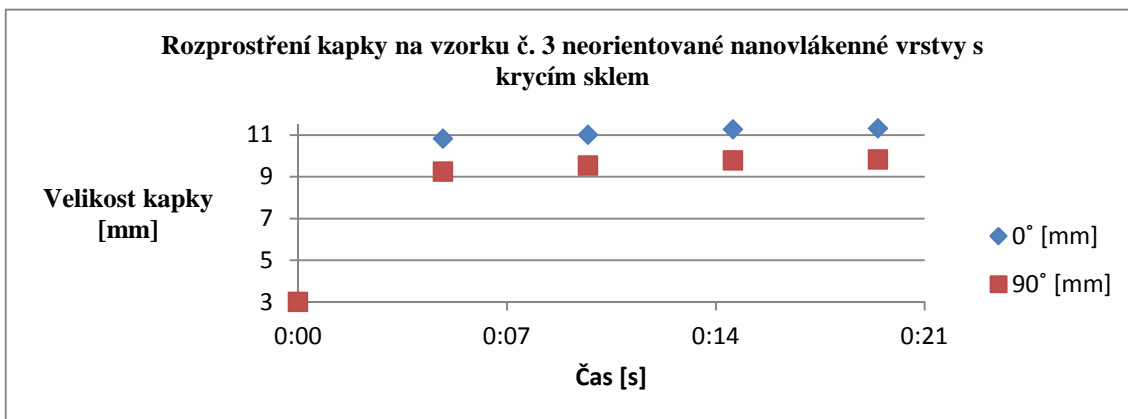
Obr. C. 5: Snímek po nanesení kapaliny na vzorek č. 3 se směry smáčení



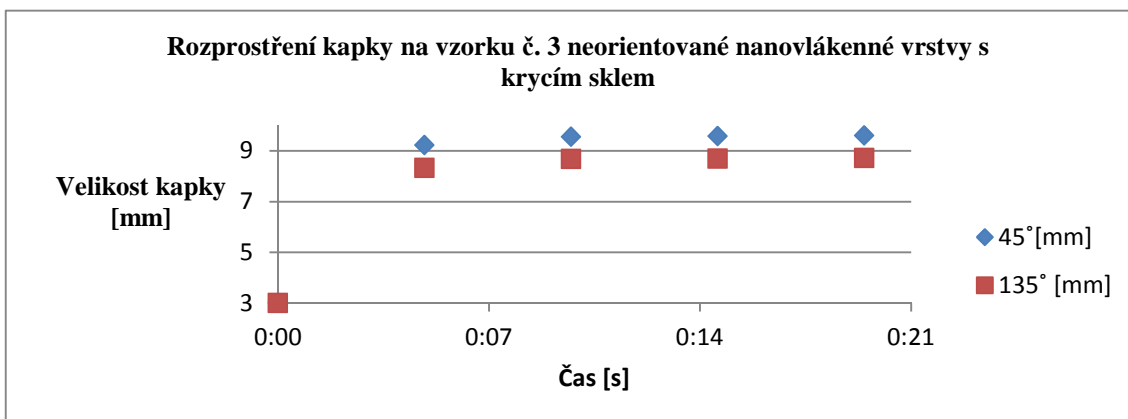
Obr. C. 6: Chování nanesené kapaliny na vzorku č. 3 po 20 s

Tab. C. 3: Směry smáčení neorientované vrstvy vzhledem k odklonění od osy vláken

Vzorek č. 3	Velikost kapky [mm] v čase 20 s					Rozprostření kapky za 20 s	
	čas [s]	0:00	0:05	0:10	0:15	0:20	o [mm]
0° [mm]	3	10,82	11	11,26	11,31	8,31	277
90° [mm]	3	9,24	9,54	9,78	9,82	6,82	327
45° [mm]	3	9,22	9,55	9,58	9,61	6,61	320
135° [mm]	3	8,33	8,68	8,69	8,72	5,72	191

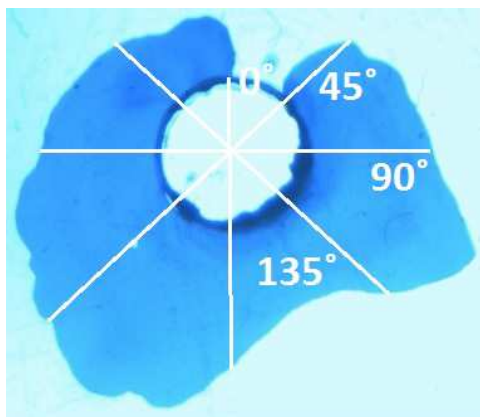


Graf C. 5: Časová závislost rozprostření kapky na vzorku č. 3 neorientované nanovlákněné vrstvy s krycím sklem vzhledem k odklonění od osy vláken o 0° a 90°

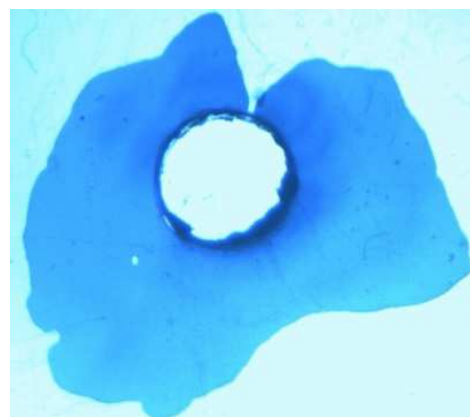


Graf C. 6: Časová závislost rozprostření kapky na vzorku č. 3 neorientované nanovlákněné vrstvy s krycím sklem vzhledem k odklonění od osy vláken o 45° a 135°

**Vzorek č. 4**



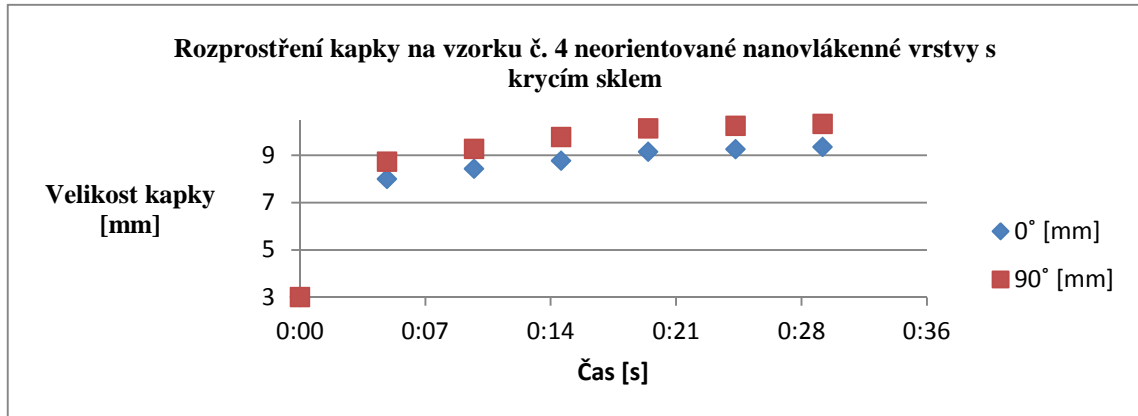
Obr. C. 7: Snímek po nanesení kapaliny na vzorek č. 4 se směry smáčení



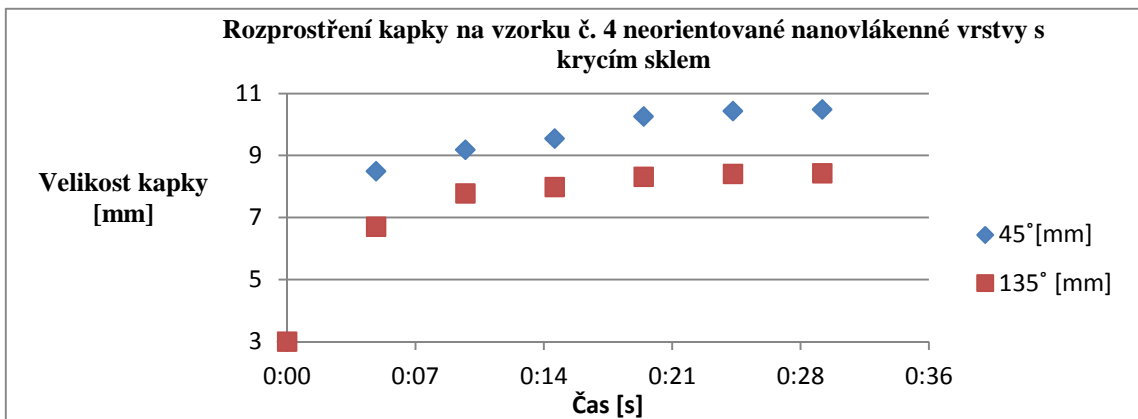
Obr. C. 8: Chování nanesené kapaliny na vzorku č. 4 po 30 s

Tab. C. 4: Směry smáčení neorientované vrstvy vzhledem k odklonění od osy vláken

Vzorek č. 4	Velikost kapky [mm] v čase 30 s							Rozprostření kapky za 30 s	
	čas [s]	0:00	0:05	0:10	0:15	0:20	0:25	0:30	o [mm]
0° [mm]	3	8	8,42	8,76	9,14	9,25	9,34	6,34	211
90° [mm]	3	8,73	9,26	9,77	10,13	10,24	10,32	7,32	244
45° [mm]	3	8,49	9,19	9,55	10,26	10,43	10,49	7,49	250
135° [mm]	3	6,71	7,78	7,99	8,32	8,41	8,43	5,43	181

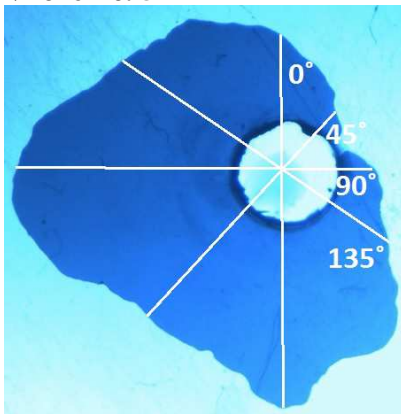


Graf C. 7: Časová závislost rozprostření kapky na vzorku č. 4 neorientované nanovláčkové vrstvy s krycím sklem vzhledem k odklonění od osy vláken o 0° a 90°

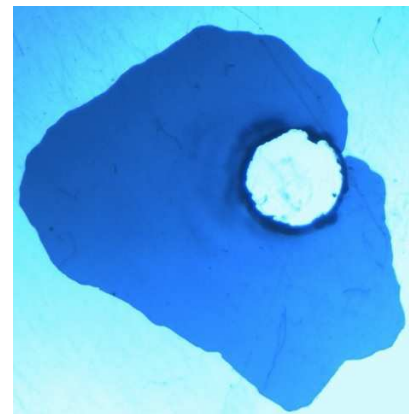


Graf C. 8: Časová závislost rozprostření kapky na vzorku č. 4 neorientované nanovláčkové vrstvy s krycím sklem vzhledem k odklonění od osy vláken o 45° a 135°

**Vzorek č. 5**



Obr. C. 9: Snímek po nanesení kapaliny na vzorek č. 5 se směry smáčení

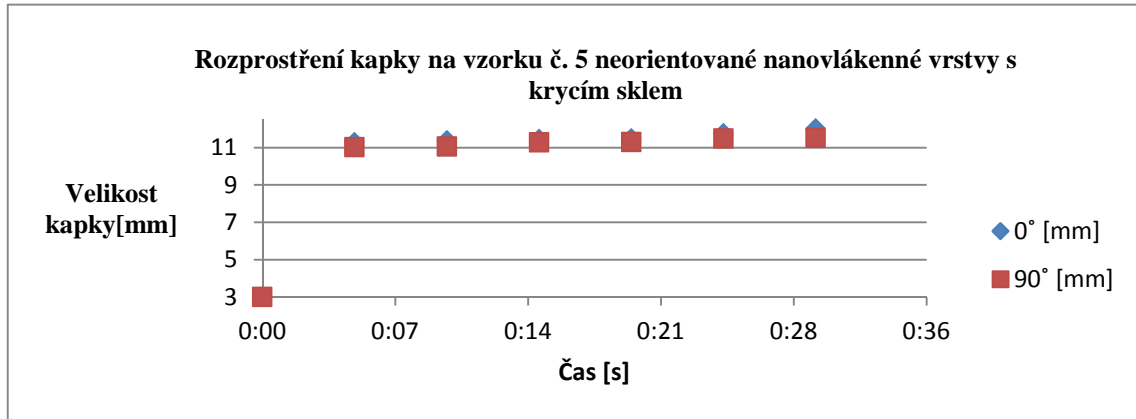


Obr. C. 10: Chování nanesené kapaliny na vzorku č. 5 po 30 s

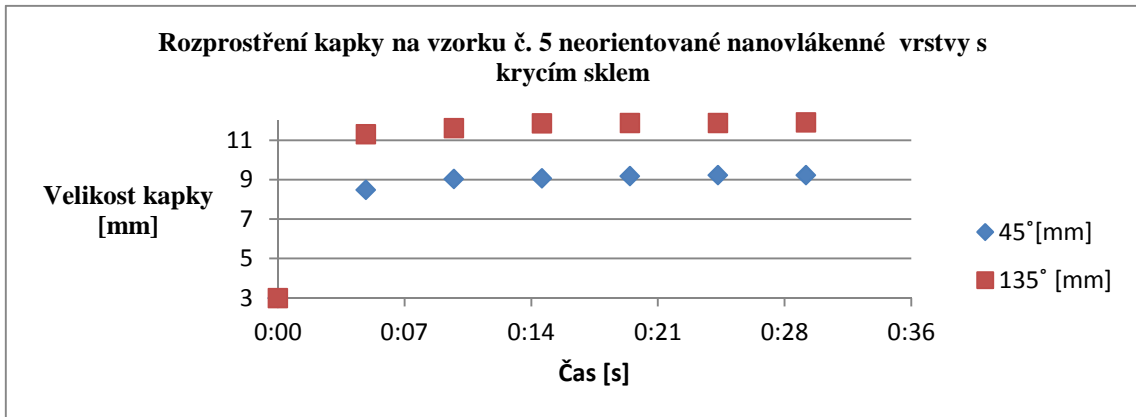


Tab. C. 5: Směry smáčení neorientované vrstvy vzhledem k odklonění od osy vláken

Vzorek č. 5	Velikost kapky [mm] v čase 30 s							Rozprostření kapky za 30 s		
	čas [s]	0:00	0:05	0:10	0:15	0:20	0:25	0:30	o [mm]	o [%]
0° [mm]		3	11,27	11,38	11,45	11,48	11,75	12,02	9,02	301
90° [mm]		3	11,02	11,05	11,28	11,29	11,48	11,51	8,51	284
45° [mm]		3	8,49	9,04	9,07	9,19	9,23	9,23	6,23	208
135° [mm]		3	11,31	11,62	11,86	11,88	11,88	11,91	8,91	297



Graf C. 9: Časová závislost rozprostření kapky na vzorku č. 5 neorientované nanovlákněné vrstvy s krycím sklem vzhledem k odklonění od osy vláken o 0° a 90°



Graf C. 10: Časová závislost rozprostření kapky na vzorku č. 5 neorientované nanovlákněné vrstvy s krycím sklem vzhledem k odklonění od osy vláken o 45° a 135°