

# **Modifikace povrchu orientovaných polymerních fólií**

Bc. Jaroslav Šemora

---

Diplomová práce  
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav fyziky a mater. inženýrství

akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jaroslav Šemora**  
Osobní číslo: **T14483**  
Studijní program: **N2808 Chemie a technologie materiálů**  
Studijní obor: **Materiálové inženýrství**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Modifikace povrchu orientovaných polymerních fólií**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši na zadané téma s využitím doporučené literatury a databázových informačních zdrojů.
2. Seznamte se s obsluhou optického goniometru, tenziometru a univerzálního testovacího stroje.
3. Provedte charakterizaci povrchových vlastností polymerních filmů a roztoků používaných pro tvorbu tenkých nánosů.
4. Pokuste se o nalezení optimálního složení a technologie nánosování různých disperzí zajišťujících lepší adhezi následných úprav (potisk, laminace) nebo definované kluzné vlastnosti výsledných fólií.
5. Získané výsledky přehledně diskutujte a srovnajte v závěrečných kapitolách diplomové práce.



Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. Hiemenz P.C.: Principles of colloid and surface chemistry. Marcel Dekker, New York 1997.
2. Pashley R.M., Karaman M.E.: Applied colloid and surface chemistry. John Wiley and Sons, 2004.
3. Butt H.J., Kappl M.: Surface and interfacial forces. Wiley-VCH. Weinheim 2010.
4. Mleziva J., Šňupárek J.: Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití. Sobotáles, 2000.

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Petr Smolka, Ph.D.**

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**15. ledna 2016**

Termín odevzdání diplomové práce:

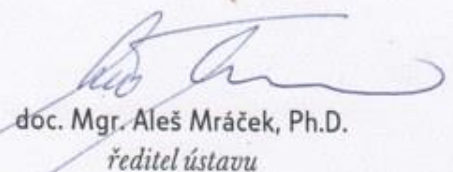
**20. května 2016**

Ve Zlíně dne 22. února 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.

*děkan*



doc. Mgr. Aleš Mráček, Ph.D.

*ředitel ústavu*

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 20. 5. 2016

Šemora

---

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

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

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

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

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

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

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

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

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

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

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce popisuje povrchové vlastnosti polymerních materiálů a některé metody využívané pro měření těchto vlastností. Dále jsou v práci popisovány technologie výroby polymerních folií a technologie úpravy jejich povrchu. Experimentální část je zaměřena na modifikaci povrchu dvou typů BOPET folií pomocí vodných disperzí a na charakteristiku povrchu čistých i nánosovaných folií. Důležitou částí experimentů je také předúprava povrchu nízkoteplotním plazmatem a s ní související měření povrchových energií pomocí statických úhlů smáčení metodou sedící kapky.

Klíčová slova: Polymerní folie, povrchové vlastnosti, úprava povrchu, BOPET, charakteristika povrchu

## **ABSTRACT**

This diploma thesis describes the surface properties of polymeric materials and some of the methods used to measurement these properties. The thesis also described technologies for making polymer films and their surface treatment technology. The experimental part focuses on surface modification of the two types of BOPET film using the aqueous dispersions and on further characteristics of virgin and treated foils. An important part of the experiments is also surface treatment by the low temperature plasma and the associated measurement of surface energy by the means of static contact angle sessile drop method.

Keywords: Polymer films, Surface properties, Surface treatment, BOPET, Surface characteristics

Těmito řádky chci poděkovat panu Ing. Petru Smolkovi, Ph. D. za cenné rady a odborné vedení při tvorbě této práce. Také chci poděkovat firmě Fatra a.s. za poskytnutí folií, měřicího zařízení a celého tématu této práce. Jmenovitě bych rád poděkoval panu Ing. Bajgarovi a panu Melichárkovi, kteří se mnou ochotně spolupracovali, a jejich rady mi byly velkým přínosem. Dále děkuji Centru polymerních systémů (registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0111), projektu NPU I (registrační číslo LO1504) a projektu Centra kompetence "Centrum pokročilých polymerních a kompozitních materiálů (registrační číslo TE01020216) za možnost využití infrastruktury a materiální podpory. Závěrem děkuji své rodině a přátelům za podporu a pochopení.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>12</b>
<b>1 POLYMERNÍ FOLIE.....</b>	<b>13</b>
1.1 POUŽÍVANÉ POLYMERY .....	13
1.1.1 Polyolefiny .....	13
1.1.1.1 Polyetylen (PE) .....	13
1.1.1.2 Polypropylen (PP) .....	14
1.1.1.3 Polyvinylchlorid (PVC) .....	14
1.1.2 Polyethery .....	15
1.1.2.1 Celulóza .....	15
1.1.3 Polyestery.....	15
1.1.3.1 Polyethyltereftalát PET .....	15
1.1.4 Polyamidy (PA).....	16
1.1.5 Lamináty .....	16
1.2 TECHNOLOGIE VÝROBY POLYMERNÍCH FOLIÍ .....	16
1.2.1 Vytlačování (extruze) .....	16
1.2.1.1 Souběžné vytlačování (koextruze) .....	17
1.2.2 Vyfukování.....	18
1.2.3 Válcování .....	18
1.2.4 Dloužení (orientování) folií .....	19
1.2.4.1 Orientované folie .....	21
1.2.5 Lití .....	21
1.2.6 Laminace.....	22
<b>2 POVRCHOVÉ VLASTNOSTI.....</b>	<b>23</b>
2.1 FÁZOVÉ ROZHRANÍ.....	23
2.2 POVRCH PEVNÉ LÁTKY .....	23
2.3 POVRCHOVÁ ENERGIE, NAPĚTÍ .....	24
2.3.1 Smáčivost povrchu .....	25
2.3.1.1 Hystereze úhlu smáčení .....	26
2.4 DRSNOST POVRCHU .....	26
2.4.1 Základní parametry drsnosti.....	26
2.4.1.1 Parametry amplitudové .....	27
2.4.1.2 Distanční parametry.....	27
2.4.1.3 Hybridní parametry .....	28
2.5 KOEFICIENT SMYKOVÉHO TŘENÍ .....	29
2.5.1 Statický koeficient smykového tření .....	29
2.5.2 Dynamický koeficient smykového tření .....	29
2.5.3 Faktory ovlivňující koeficient smykového tření .....	30
2.5.3.1 Vliv rychlosti smýkání.....	30
2.5.3.2 Vliv mezifázové drsnosti .....	30
2.5.3.3 Vliv zatížení a přítlačné síly.....	31
2.5.4 Snížení COF pomocí kluzných aditiv .....	31
2.5.5 Snížení COF pomocí antiblokačních aditiv .....	32



<b>3</b>	<b>METODY ANALÝZY POVRCHU .....</b>	<b>33</b>
3.1	MĚŘENÍ KOEFICIENTU SMYKOVÉHO TŘENÍ.....	33
3.1.1	Nakloněná rovina.....	33
3.1.2	Vodorovná deska .....	34
3.1.3	Kyvadlové testovací zařízení .....	34
3.1.4	Metoda DCOF AcuTest .....	35
3.1.5	Normy pro měření koeficientu smykového tření .....	35
3.2	MĚŘENÍ POVRCHOVÉ ENERGIE, NAPĚTÍ.....	36
3.2.1	Metoda štěpení podle roviny štěpitelnosti .....	37
3.2.2	Kontaktní úhel smáčení .....	37
3.2.2.1	Metoda přisedlé kapky, přilínající bubliny .....	37
3.2.2.2	Metoda naklánění destičky .....	38
3.2.2.3	Metoda vyvažování Wilhelmyho destičky.....	38
3.2.3	Použití inkoustů nebo fixů .....	39
3.3	PROFILOMETRIE .....	40
3.3.1	Kontaktní profilometrie .....	40
3.3.2	Optická profilometrie.....	40
3.3.2.1	Interferometrie nízké koherence.....	41
3.4	MIKROSKOPIE .....	41
3.4.1	Optická mikroskopie.....	41
3.4.2	Elektronová mikroskopie (SEM).....	42
3.4.3	Mikroskopie atomárních sil (AFM).....	42
<b>4</b>	<b>POVRCHOVÉ ÚPRAVY PLASTŮ .....</b>	<b>44</b>
4.1	PŘEDÚPRAVY POVRCHU.....	44
4.1.1	Koronová předúprava .....	44
4.1.2	Plazmová předúprava.....	44
4.1.2.1	Využití nízkoteplotního plazmatu .....	45
4.2	TECHNOLOGIE POVLAKOVÁNÍ.....	46
4.2.1	PVD povlakování .....	46
4.2.1.1	Reaktivní napařování .....	46
4.2.1.2	Reaktivní napařování .....	47
4.2.1.3	Magnetronové napařování .....	47
4.3	NÁNOSOVÁNÍ VODNÝCH DISPERZÍ.....	48
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>ANALÝZA POVRCHU NEUPRAVENÝCH FOLIÍ A ROZTOKŮ NÁNOSOVACÍCH DISPERZÍ .....</b>	<b>50</b>
5.1	POUŽITÉ MATERIÁLY A DISPERZE .....	50
5.1.1	BOPET folie.....	50
5.1.2	Primal AC 201 ER.....	50
5.1.3	Bindzil CC.....	51
5.2	MĚŘENÍ POVRCHOVÉ ENERGIE FOLIÍ.....	51
5.2.1	Teorie OWRK (Owens-Wendt-Rabel-Kaelble) .....	51
5.2.2	Kondicionování vzorků.....	52
5.2.3	Zvolené kapaliny .....	52
5.2.4	Přístroje a programy .....	53

5.2.5	Výsledky .....	53
5.2.6	Měření povrchových energií pomocí inkoustů.....	55
5.3	PROFILOMETRIE (MĚŘENÍ DRSNOSTI).....	56
5.3.1	Optická profilometrie.....	56
5.3.1.1	Přístroj.....	56
5.3.1.2	Výsledky .....	56
5.3.2	Mechanická profilometrie .....	57
5.3.2.1	Přístroj.....	57
5.3.2.2	Výsledky .....	58
5.4	MĚŘENÍ SUŠINY ZÁSOBNÍCH DISPERZÍ .....	59
5.4.1	Přístroje a programy .....	59
5.4.2	Výsledky měření.....	60
5.5	MĚŘENÍ POVRCHOVÉHO NAPĚTÍ ZÁSOBNÍCH DISPERZÍ.....	60
5.5.1	Přístroje .....	60
5.5.2	Výsledky měření.....	61
5.6	SLOŽENÍ ROZTOKŮ NANÁŠENÝCH DISPERZÍ .....	61
5.7	PŘEDÚPRAVA FOLIÍ PŘED NANÁŠENÍM.....	62
5.7.1	Předúprava nízkoteplotním plazmatem .....	62
5.7.1.1	Přístroje .....	62
5.7.1.2	Parametry plazmování .....	62
5.7.2	Povrchové energie předupravených folií .....	63
5.8	NANÁŠENÍ VRSTEV .....	64
5.8.1	Přístroje a pomůcky .....	64
5.9	MĚŘENÍ KOEFICIENTU SMYKOVÉHO TŘENÍ (VODOROVNÁ DESKA).....	64
5.9.1	Přístroje a programy .....	65
5.9.2	Použitá norma a její změny .....	65
5.9.3	Vyhodnocení metody.....	66
5.9.4	Výsledky a diskuse .....	66
<b>6</b>	<b>MĚŘENÍ POVRCHOVÝCH VLASTNOSTÍ MODIFIKOVANÝCH FOLIÍ.....</b>	<b>67</b>
6.1	MĚŘENÍ KOEFICIENTU SMYKOVÉHO TŘENÍ (NAKLONĚNÁ ROVINA).....	67
6.1.1	Přístroje a pomůcky .....	67
6.1.2	Výsledky měření.....	68
6.1.2.1	Folie bez siliky .....	68
6.1.2.2	Folie s aditivem (silika) .....	71
6.1.2.3	Výrobní nánosy, Fatra a. s. (folie se silikou, tloušťka 12 μm).....	72
<b>7</b>	<b>OBRAZOVÁ ANALÝZA VÝSLEDNÝCH NÁNOSŮ .....</b>	<b>74</b>
7.1	SEM.....	74
7.1.1	Přístroje .....	74
7.1.2	Výsledné snímky laboratorních nánosů .....	74
7.1.2.1	Neaditivovaná folie (bez Siliky) .....	74
7.1.2.2	Folie s aditivem (silika) .....	79
<b>ZÁVĚR .....</b>		<b>83</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>		<b>84</b>

<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>90</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>92</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>94</b>
<b>SEZNAM GRAFŮ.....</b>	<b>95</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>96</b>

## ÚVOD

Polymery jsou v současnosti druhým nejhojněji využívaným obalovým materiálem (prvním je papír). Díky rychlosti rozvoje polymerních materiálů je pravděpodobné, že v nejbližších letech bude plast pro obaly nejvyužívanější.

Aby mohly být polymerní folie použity jako primární obal, musí splňovat řadu požadavků a vlastností, hlavně vlastnosti mechanické a bariérové. Mechanické vlastnosti představují především dostatečnou pevnost v tahu, tuhost nebo tažnost. Bariérové vlastnosti ovlivňují propustnost světla, kyslíku, vlhkosti, CO<sub>2</sub>, aromat nebo tuku. Také je důležitá dostatečná odolnost vůči chemikáliím, popřípadě vůči výrobku uvnitř. A je kladen důraz na minimální vylučování látek z folie k výrobku, hlavně potravinovému.

Důležité jsou také vlastnosti povrchové jako například koeficient smykového tření a povrchová energie. Tyto vlastnosti a další s nimi související ovlivňují především samotnou výrobu, úpravu a manipulaci s vyrobenými foliemi. [1]

Povrchové vlastnosti lze upravovat řadou metod, z nichž některé byly vybrány a použity v této práci k modifikaci povrchu biaxiálně orientovaných polymerních folií, určených k různému použití v obalovém průmyslu. Pozornost byla věnována zejména koeficientu tření fólie, který zásadně ovlivňuje jak zpracovatelské, tak uživatelské vlastnosti materiálu a finálního výrobku.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 POLYMERNÍ FOLIE

Pojem polymerní folie není zcela přesně definován. Jako základní definici lze použít tvrzení, že se jedná o planární formu polymeru, která je samonosná. Podmínka samonosnosti je také určující pro nejnižší možnou tloušťku, která je dána typem použitého materiálu a jeho mechanickými vlastnostmi. Horní hranice tloušťky, kdy už nelze použít název folie, je nejasná a závisí na samotném polymeru a hmatové odezvě posuzujícího člověka.

### 1.1 Používané polymery

K výrobě polymerních folií lze použít celou řadu polymerů a kopolymerů, z nichž základní skupiny a jejich zástupci jsou popsány v této části.

#### 1.1.1 Polyolefiny

Typickým zástupcem termoplastických polymerů, hojně využívaných na výrobu folií, jsou polyolefiny. Jsou to polymery tvořené z uhlovodíků obsahujících alespoň jednu dvojnou vazbu, které se nazývají alkeny nebo také olefiny. [2]

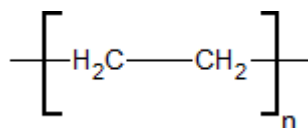
##### 1.1.1.1 Polyetylen (PE)

Na výrobu folií se používá převážná část produkce rozvětveného (nízkohustotního) PE (LDPE). Lze z něj vyrábět těžké izolační a technické obaloviny, pigmentované sáčky na mléko, tenké transparentní, smršťovací folie. Může se také využít jako vrstva v laminátech pro zamezení vniknutí vlhkosti k balenému výrobku anebo lze na PE laminovat hliník pro použití například jako obal pro léčiva.

Na výrobu folií lze využít také lineární (vysokohustotní) PE (HDPE). Na rozdíl od LDPE lze dosáhnout nižších tlouštěk folie 7-10  $\mu\text{m}$ .

K výrobě folií mohou být použity kopolymery etylenu a to především s vinylacetátem (EVA). Folie z tohoto kopolymeru se dají svařovat a využívá se ve stavebnictví pro folie odolné proti povětrnosti.

Nejpoužívanější technologii výroby tenkých folií je vytlačování přes kruhovou vytlačovací hlavu s následným rozfukováním folie. [3]

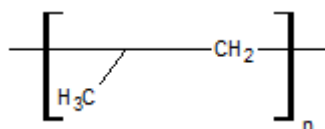


Obrázek 1: Konstituční vzorec polyetylenu [4]

### 1.1.1.2 Polypropylen (PP)

Oproti PE mají folie z PP výrazně nižší sklon ke korozi pod napětím, vykazují vyšší pevnost v ohybu a tvrdost, ale zároveň jsou náchylné k působení UV záření a pod jeho vlivem praská a křehne, proto je nutné použití stabilizátorů a UV absorbérů (použití 2,5% sazí zajistí cca 6 let odolnost vůči povětrnosti). Folie z PP lze orientovat, poté se využívají například k balení potravin a pro výrobu varných sáčků.

Dále se na výrobu folií využívají kopolymery propylenu s etylenem (EPM a EPDM). Tyto folie se uplatňují ve stavebnictví například jako střešní izolace. [3]

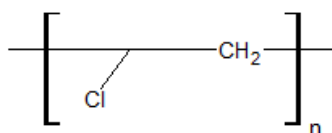


Obrázek 2: Konstituční vzorec polypropylenu [4]

### 1.1.1.3 Polyvinylchlorid (PVC)

Polyvinylchlorid patří do skupiny substituovaných olefinů nebo také polyhalogenidolefinů. Na folie lze zpracovávat takzvaný tvrdý PVC (obsah změkčovadla 0-12%). Tento PVC se zpracovává válcováním na čtyřválcí nebo vytlačovány přes plochou vytlačovací hlavu. Z takto vyrobené folie se vyrábí např. blistry a obaly pro grafické a reklamní účely.

Měkký nebo také měkčený PVC (vysoký obsah změkčovadel) na rozdíl od tvrdého PVC prochází tzv. želatínací, což je nevratná změna probíhající při 160 až 180 °C a vzniká z disperzního solu homogenní gel. Tyto folie se dají lehce vysokofrekvenčně svařovat a používají se např. pro výrobu nafukovacích hraček. [3,5]



Obrázek 3: Konstituční vzorec polyvinylchloridu [4]

### 1.1.2 Polyethery

Polyethery jsou makromolekulární látky, jejichž monomery obsahují dvou vaznou skupinu -O-. Do této kategorie patří například celulóza, což je polysacharid používaný na výrobu folií uplatňujících se především v potravinářském průmyslu.

#### 1.1.2.1 Celulóza

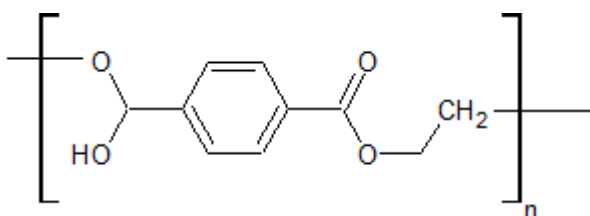
Jedná se o přírodní polyether (polysacharid) nacházející se v rostlinných buněčných stěnách. K výrobě vláken nebo folií se využívá její syntetické rozpustné formy, takzvaného regenerátu, který se nazývá také viskóza. Celulózové folie, známé pod názvem celofán, jsou hojně využívány v potravinářském průmyslu. Na výrobu folií se také využívají deriváty celulózy. Například z acetátu celulózy se kvůli jeho vysoké elektrické pevnosti vyrábí elektroizolační folie.

### 1.1.3 Polyestery

Velká skupina polymerů obsahující charakteristickou esterovou vazbu k výrobě folií se využívá především polyetylentereftalát.

#### 1.1.3.1 Polyetylentereftalát PET

Jedná se o polyester kyseliny tereftalové a etylenglykolu a jde o nejvýznamnější lineární polyester současnosti. Folie vyrobené z tohoto polymeru mají výrazně vyšší pevnosti než ostatní folie z termoplastů. Další výhody jsou také rozměrová stálost při malé tloušťce a vysoká tepelná odolnost, odolnost proti olejům a dobré elektroizolační vlastnosti. Tyto folie se využívají i v elektrotechnickém průmyslu, jako obalové, metalizované a potiskovatelné folie. Výroba probíhá obvykle vytlačováním a následnou orientací (současnou, postupovou) v obou směrech. [3]



Obrázek 4: Konstituční vzorec polyetylentereftalát [4]



### 1.1.4 Polyamidy (PA)

Polyamidy jsou lineární polymery vyznačující se výskytem charakteristické amidové skupiny -CONH-. Na folie se dají zpracovávat postupy typickými pro termoplasty a výroba folií zaujímá zhruba 11% celkové produkce polyamidů. Využití polyamidových folií souvisí s jejich nepropustností kyslíku, a proto se používají v potravinářském průmyslu například k balení masa, sýrů, ryb apod. [3]

### 1.1.5 Lamináty

Obecně lze laminátem nazvat kompozit vytvořený z několika vrstev stejného nebo různého materiálu. U folií lze kombinovat bariérové vlastnosti jednotlivých materiálů pro dosažení co nejlepšího výsledku pro požadovanou aplikaci. Výsledné laminátové folie se využívají převážně v potravinářském a chemickém průmyslu a vyrábí se koextruzí (souběžným vytlačováním) nebo spojováním již hotových folií (laminací), často lepením. [2]

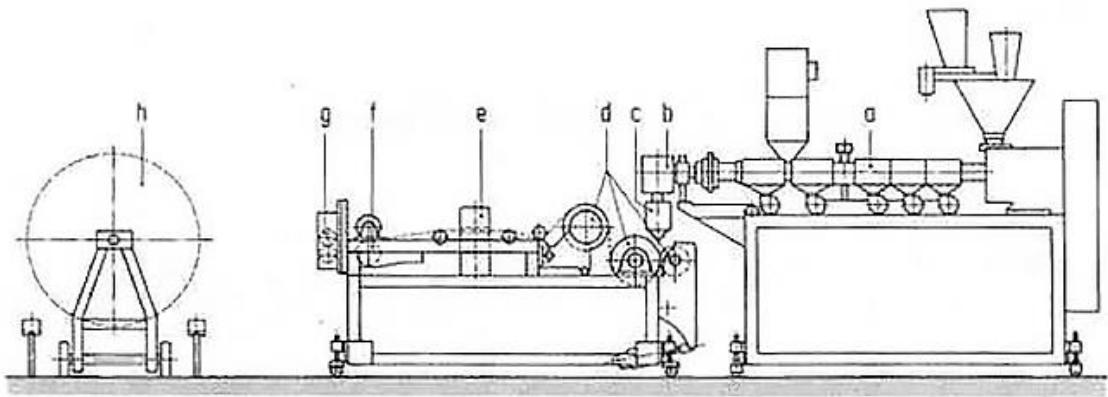
## 1.2 Technologie výroby polymerních folií

Folie lze vyrábět některými klasickými způsoby tváření plastů. Jednotlivé linky se většinou skládají z různých částí a jsou v nich použity různé technologie, podle požadavků na výsledný produkt.

### 1.2.1 Vytlačování (extruze)

Vytlačování je proces, při kterém je plast ve formě taveniny vytlačován přes tzv. vytlačovací hlavu do volného prostoru. Pro výrobu folií se používá širokoštěbinová vytlačovací hlava nebo vyfukovací hlava a vytlačovací stroj bývá zpravidla šnekový. Pro každý polymer musí být navržen vytlačovací stroj, který splňuje určité parametry, aby nedocházelo ke vzniku nežádoucích defektů.

Tato technologie není využívána samostatně, ale jsou k ní přidružené další operace a přístroje, například odtahovací zařízení, zařízení pro prodloužení, chladicí válce, rozfukovací zařízení atd. [6]

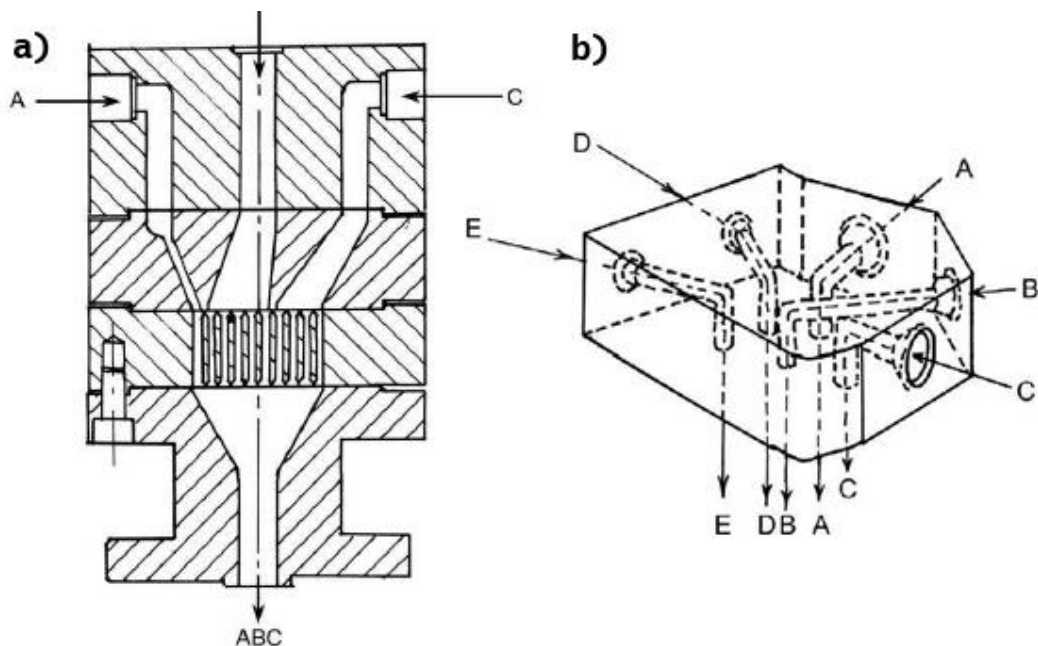


Obrázek 5: Příklad vytlačovací linky [6]

Kde: *a* – vytlačovací stroj, *b* – adaptér, *c* – vytlačovací hlava, *d* – chladicí válce s odtahem, *e* – měření tloušťky, *f* – úprava povrchu, *g* – řezací zařízení, *h* – navíjení

### 1.2.1.1 Souběžné vytlačování (koextruze)

Technologie koextruze se používá k tvorbě vícevrstevných folií. Zpravidla se využívají šnekové vytlačovací stroje a speciální vytlačovací hlavy. Často se mezi vytlačovací stroj a vytlačovací hlavu zařazuje tzv. adapter, který zprostředkovává spojení toků jednotlivých tavenin a takto spojené toky posílá do tzv. feed bloku. Feed blok dále tok upravuje, stabilizuje a předává dál vytlačovací hlavě, která může být buď jednokanálová, nebo vícekanálová. [11]



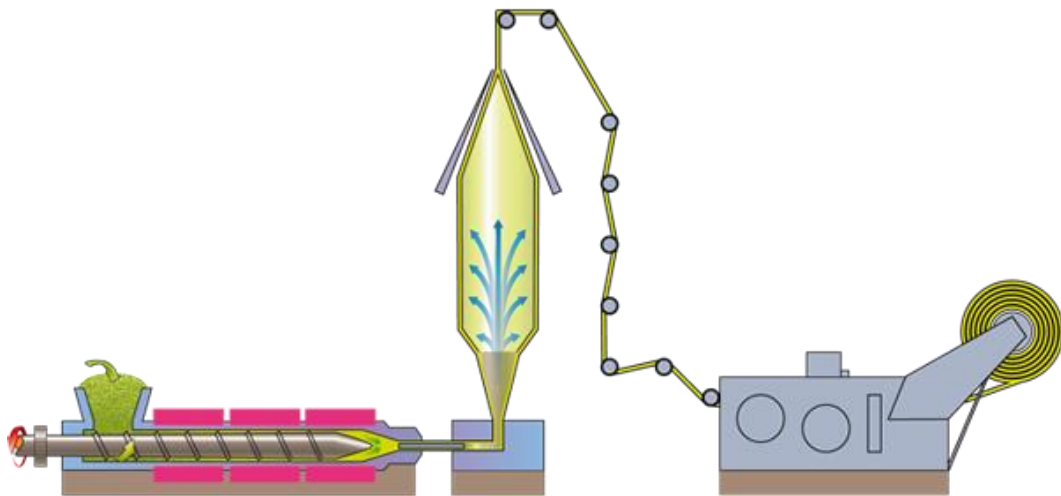
Obrázek 6: a) Feed blok (3 vrstvy), b) Adaptér (5 vrstev) [11]

### 1.2.2 Vyfukování

Tento proces spočívá v rozfukování kruhového profilu za tepla a používá se výhradně k výrobě folií. Profil je vytvořen jedním nebo vícero (v případě koextruze) šnekovými vytlačovacími stroji, které mají společnou vytlačovací hlavu. Materiál musí být v plastickém stavu. Po vyfouknutí tzv. rukávu je folie ochlazována a tak je fixován její tvar, a poté je folie navinuta na válec.

Linka bývá nejčastěji opatřena horním odtahem (viz obr. 6). Odtah může být také horizontální nebo spodní. Pro tvorbu taveniny se nejčastěji používají jednošnekové vytlačovací stroje.

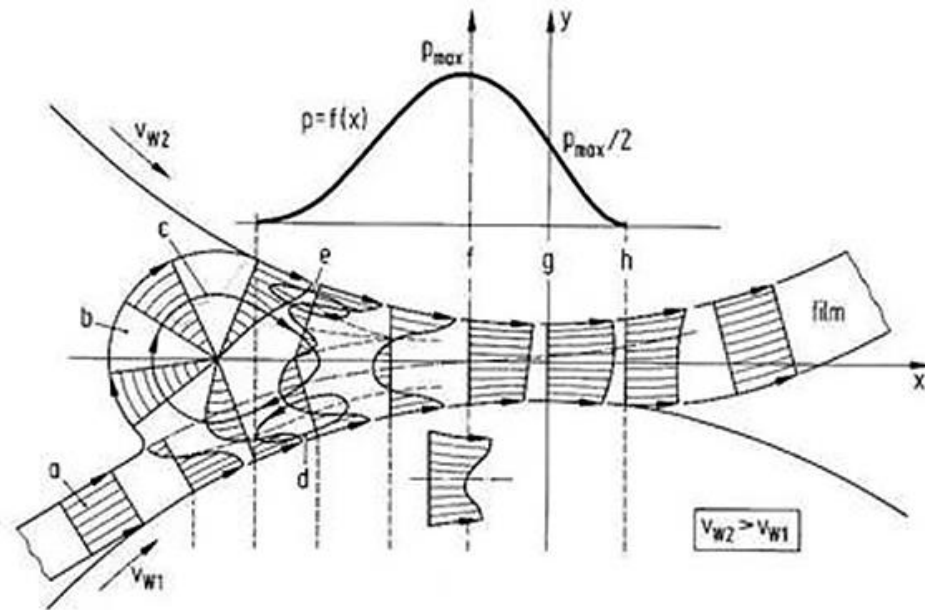
Linka s horizontálním odtahem je používána pro materiály citlivé na teplotu. Při tomto uspořádání je problém v působení tíhové síly a je nutné rukáv podpírat vodícími válci. Vlivem tíhové síly dochází k nerovnoměrnému rozdělení tloušťky folie. Tento problém je částečně vyřešen rotačním pohybem odtahového zařízení nebo vytlačovací hlavy. [6, 7]



Obrázek 7: Schéma vyfukovací linky s horním odtahem [7]

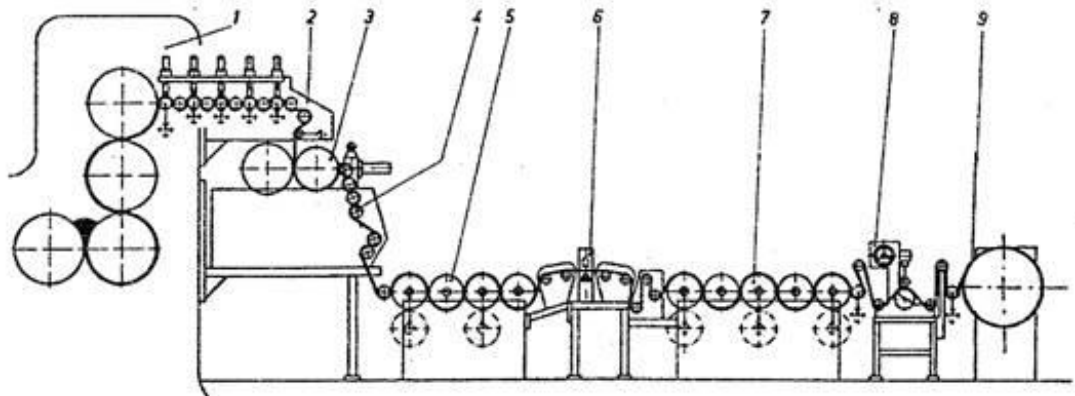
### 1.2.3 Válcování

Technologický proces válcování je používán převážně k výrobě folií, podlahovin, koženek, ale také k míchání a drcení polymerů. Intenzita míchání je měněna úpravou šířky štěrbinu nebo změnou rychlosti rotace válců.



Obrázek 8: Tlakové poměry ve štěrbině mezi válci [6]

Válcovací linky se mohou skládat z různého počtu válců a válce také mohou být různým způsobem seřazeny. Často obsahují doplňkové technologie např. pro chlazení, dloužení, ořezávání atd. [6]



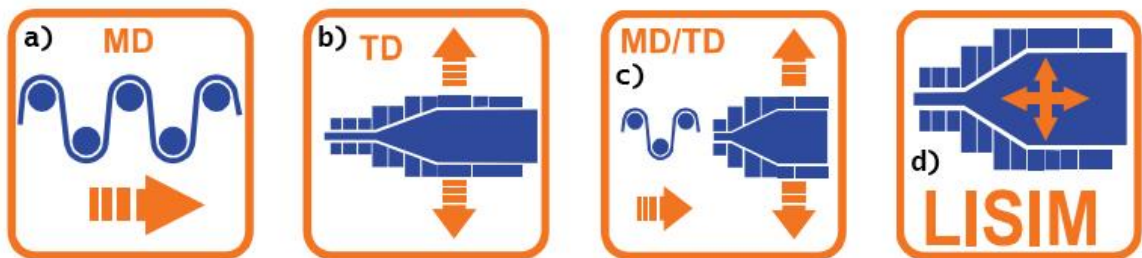
Obrázek 9: Příklad válcovací linky, výroba folie z měkčeného PVC [6]

Kde: 1- čtyřválcový kalandr, 2 – válečkový odtah, 3 - desénovací válce, 4 – odtah, 5 – temperace, 6 – měření tloušťky, 7 – chlazení, 8 – ořezávání okrajů, 9 - navijení

#### 1.2.4 Dloužení (orientování) folií

Zařízení pro orientování folií může být zařazeno za chladící válce vytačovací linky nebo může fungovat samostatně. Orientace probíhá buď monoaxiálně (podélný směr), nebo biaxiálně (podélný i příčný směr). Ochlazená folie se nejprve znovu přehřeje na potřebnou

teplotu (vždy pod teplotou tání polymeru), následně je dlouzena a dlouzení je poté zafixováno ochlazením.

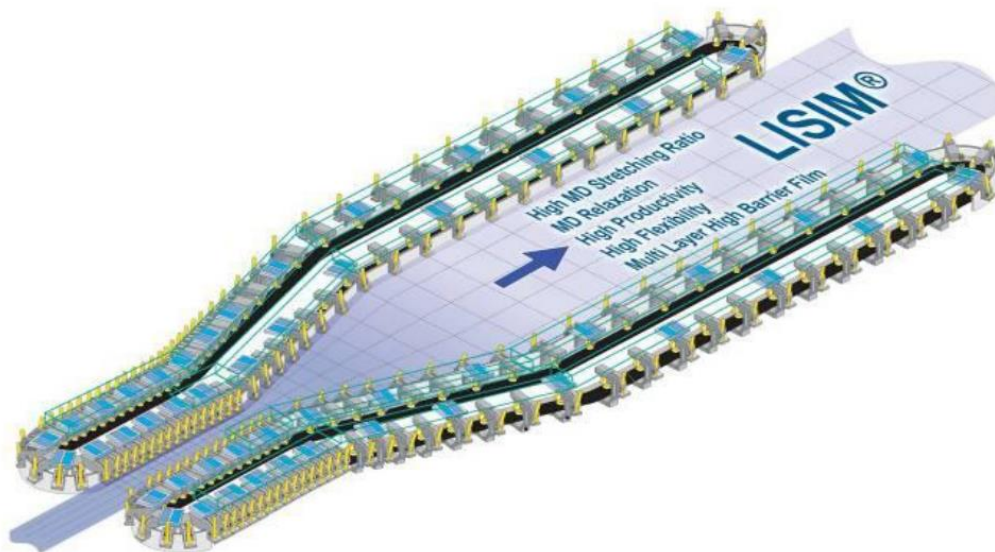


Obrázek 10: Schématické znázornění všech typů dlouzení [8]

Kde: a) monoaxiální podélné, b) monoaxiální příčné, c) biaxiální dvoustupňové, d) biaxiální jednostupňové

Monoaxiální dlouzení v podélném směru bývá nejčastěji zprostředkováno různou obvodovou rychlostí válců.

Biaxiální dlouzení probíhá jednostupňovým nebo dvoustupňovým procesem. Při dvoustupňovém procesu se nejprve folie dlouzí v příčném směru oddalováním řetězů, ke kterým je přichycena folie, a až poté je dlouzena ve směru podélném. Výhoda tohoto uspořádání je možnost rozdílného dlouzení v příčném a podélném směru a jednoduchost linky. U jednostupňového procesu se řetězy oddalují od sebe v příčném směru a zároveň dochází i k oddalování svorek upevňujících folii. Výhoda jednostupňového dlouzení je izotropní struktura výsledné folie a nižší spotřeba energie oproti způsobu dvoustupňovému. [6, 8]



Obrázek 11: Přístroj pro jednostupňové biaxiální dlouzení [8]

### 1.2.4.1 Orientované folie

Dloužení folií se používá především k zlepšení mechanických vlastností ve směru dloužení (např. pevnosti v tahu, modulu pružnosti v tahu). U jednosměrně dložených materiálů dochází ke zlepšení mechanických vlastností ve směru dložení, ovšem v příčném směru může dojít k výraznému zhoršení těchto vlastností. Proto je stále více využíváno biaxiální dložení. Typickými materiály pro biaxiální dložení jsou PP, PET a PA.

Tabulka 1: Porovnání základních mechanických vlastností běžných biaxiálně dložených folií [9]

mechanické vlastnosti			typ a tloušťka folie		
			20 $\mu\text{m}$ BOPP	12 $\mu\text{m}$ BOPET	15 $\mu\text{m}$ BOPA
pevnost v tahu	MD	[N/mm <sup>2</sup> ]	140	230	250
	TD	[N/mm <sup>2</sup> ]	280	260	280
moduly pevnosti v tahu	MD	[N/mm <sup>2</sup> ]	2000	4400	3500
	TD	[N/mm <sup>2</sup> ]	3500	5200	3800
prodloužení	MD	[%]	220	110	110
	TD	[%]	70	90	100

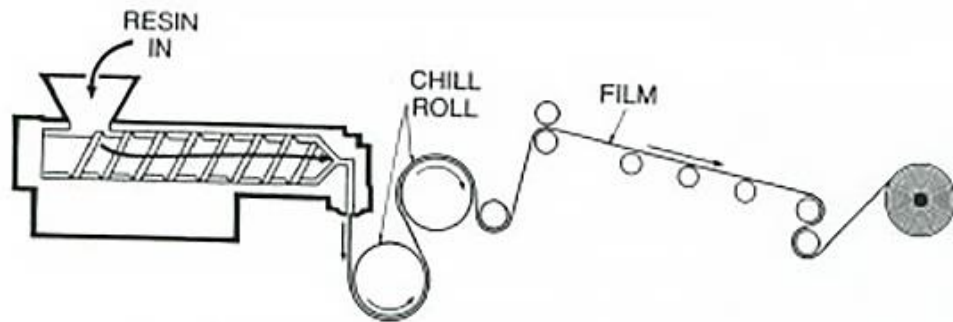
Kde: MD- machine direction (ve směru odtahu válců), TD- transversal direction (směr kolmý k MD)

Nejvíce vyráběnou biaxiálně orientovanou folií je v současné době BOPP, které je ročně vyrobeno cca 11,5 milionů tun, což představuje 59 % všech vyrobených biaxiálně dložených folií. Na druhém místě je BOPET, kterého se vyrobí 6,6 milionu tun ročně a zaujímá 34 % trhu. Zbývajících 7 % je rozděleno mezi BOPS, BOPA, BOPVC a další polymery. Trh s těmito foliemi ročně roste zhruba o 6%. [9, 11]

### 1.2.5 Lití

Polymer je v podobě roztoku, pasty nebo taveniny nepřetržitě lit na plochu licího stroje a následně se získává folie. Z roztoku odpařením nebo vysrážením, z taveniny ochlazením a z past želatinací. Licí stroje jsou buď pásové, nebo bubnové. Tvorba taveniny bývá obvykle zprostředkována vytlačovacím strojem.

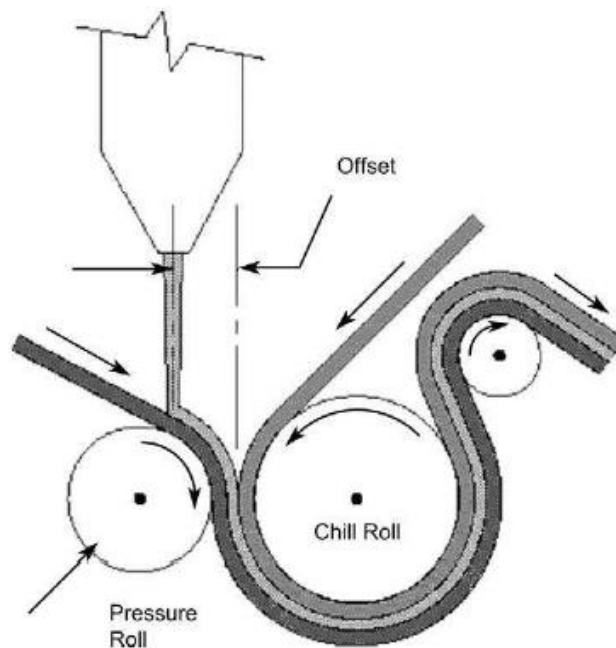
Výhoda této technologie jsou ve výsledku kvalitní folie, které nevykazují vnitřní pnutí. S kvalitou ovšem souvisí i cena a takto vyrobené folie jsou mnohem dražší než folie vytlačované nebo válcované. [6, 10]



Obrázek 12: Schéma výroby lité folie na studený válec [12]

### 1.2.6 Laminace

V případě že není možné vyrobit vícevrstvou folii pomocí koextruze, často z technických nebo ekonomických důvodů, může být folie vytvořena laminací. Tato technologie spočívá ve spojování jednotlivých vrstev z již vytvořených folií pomocí vhodného adheziva (lepidla). Při laminaci je třeba předcházet problémům. Folie musí být čisté, pro zvolenou aplikaci musí být vhodné adhesivum a musí být zajištěna dobrá kondice válců. [11]



Obrázek 13: Příklad laminačního stroje [11]

## 2 POVRCHOVÉ VLASTNOSTI

Před popisem některých povrchových vlastností budou stručně přiblíženy pojmy fázové rozhraní a povrch pevné látky, které se dále v textu nacházejí.

### 2.1 Fázové rozhraní

V případě, že se v systému nachází více fází, definujeme přechod mezi těmito fázemi jako fázové rozhraní. Jako fáze je z termodynamického hlediska označováno prostředí, které je fyzikálně a chemicky homogenní a od ostatních částí soustavy jej dělí tzv. fázové rozhraní. Fázové rozhraní je oblast soustavy, jejíž jedna nebo více vlastností se mění skokem za předpokladu nepůsobení vnějších sil. Fázové rozhraní je charakteristické svou plochou a může být také charakterizováno zakřivením povrchu. Typickým zástupcem fázového rozhraní je povrch.

### 2.2 Povrch pevné látky

Povrch je část látky, která interaguje s okolním prostředím. Povrch pevné látky je nejlépe popsán molekulárním uspořádáním a lze ho definovat jako poslední atomární rovinu nebo také část látky (okraj), který se liší od zbytku (objemu) svým uspořádáním nebo složením molekul.

Se zlepšujícími se technologiemi analýzy povrchu bylo zjištěno, že na celkových povrchových vlastnostech se nepodílí pouze horní vrstvy povrchu, ale také vrstvy další pod nimi až do hloubky cca 100  $\mu\text{m}$ . [13]

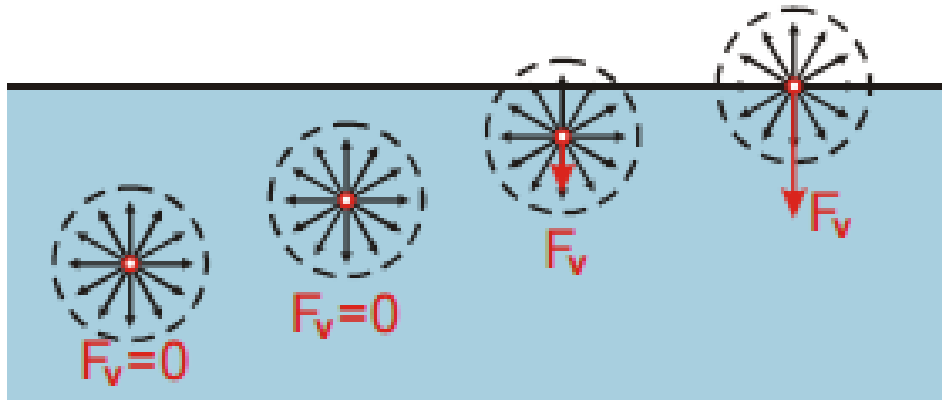
Tabulka 2: Rozdělení povrchové vrstvy [13]

Oblast	Rozměr	Funkční ovlivnění
Horní nanovrstva	0,1 nm	Adsorpce, chemická reaktivita
Tenký film oxidace	0,1 – 100 nm	Odrazivost, tření, koroze, tepelná vodivost
Vnější povrchová vrstva	0,1 – 100 $\mu\text{m}$	Deformace struktury
Celková povrchová vrstva	> 100 $\mu\text{m}$	Adheze, nátěry



### 2.3 Povrchová energie, napětí

Atomy a molekuly nacházející se v povrchové vrstvě jsou v odlišném prostředí oproti molekulám nacházejícím se v objemu. V objemu bývá molekula rovnoměrně přitahována molekulami okolními, tudíž výslednice sil působících na molekulu je nulová.



Obrázek 14: Síly působící na molekulu v kapalině [14]

Povrchové atomy a molekuly jsou ovšem přitahovány nerovnoměrně pouze z jedné strany a mají tendenci opouštět povrchovou vrstvu a posunovat se do objemu. U kapalin je definováno tzv. povrchové napětí a souvisí se změnou plochy fázového rozhraní, která je zapříčiněna přechodem molekul z objemu do fázového rozhraní, což doprovází vykonání určité práce.

$$dW^{\text{rozhr.}} = \gamma \cdot dA \quad (1)$$

Kde:

$dW^{\text{rozhr.}}$  vyjadřuje elementární práci, úměrnou počtu molekul přešlých z objemu do fázového rozhraní, konstanta  $\gamma$  vyjadřuje mezifázovou energii a má v základních jednotkách SI rozměr  $[\text{J} \cdot \text{m}^{-2}]$ , používanější jednotka je ovšem jednotka odvozená a vzhledem k velikosti povrchové energie vhodnější  $[\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}]$ .

Povrchové napětí lze tedy definovat jako energii potřebnou ke zvětšení povrchu kapaliny o jednotkovou plochu. [15, 16]

Pro pevnou látku není popis takto jednoduchý, protože pevná látka za normálních podmínek nemůže zaujmout tvar s nejmenší povrchovou energií jako kapalina. Vznik nového povrchu v pevné látce probíhá ve dvou krocích. V prvním kroku se rozdělí materiál, ve druhém se poté přeskupí atom v povrchové oblasti do konečných rovnovážných poloh.

Povrchová energie je též závislá na předchozí historii zkoumaného vzorku. [16, 17]

### 2.3.1 Smáčivost povrchu

Smáčivost lze charakterizovat jako vlastnost kapaliny přilnout k povrchu pevné látky. Tato vlastnost úzce souvisí s povrchovým napětím kapaliny a povrchovou energií pevné látky, na kterou je kapalina ve formě kapky umístěna. Při umístění kapky na povrch mohou nastat dva případy. Buď kapalina smáčí nebo nesmáčí povrch pevné látky, popřípadě jiné kapaliny u rozhraní mobilních fází.

Rovnovážná podmínka známá jako Youngova rovnice říká, že součet vektorů mezifázových napětí je nulový:

$$\gamma_{sg} = \gamma_{sl} + \gamma_{lg} \cdot \cos \theta \quad (2)$$

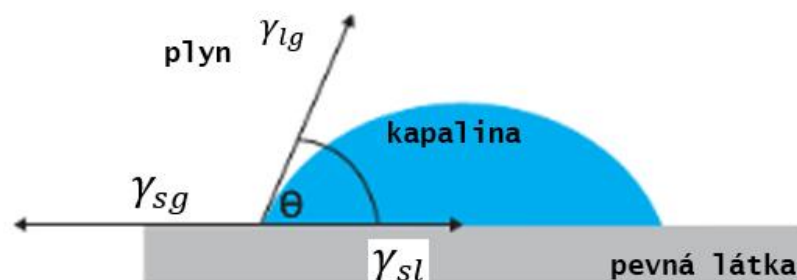
Úpravou Youngovy rovnice lze vyjádřit kontaktní úhel smáčení:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{sg} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lg}} \quad (3)$$

Kde:  $\gamma_{sg}$  je povrchová energie pevné látky,  $\gamma_{sl}$  mezifázová energie pevná látka- kapalina,  $\gamma_{lg}$  je povrchové napětí kapaliny.

Kapalina smáčí povrch v případě, že s povrchem svírá ostrý úhel smáčení ( $0^\circ < \theta < 90^\circ$ )

Kapalina nesmáčí povrch v případě, že s povrchem svírá tupý úhel smáčení ( $90^\circ < \theta < 180^\circ$ ). [18]



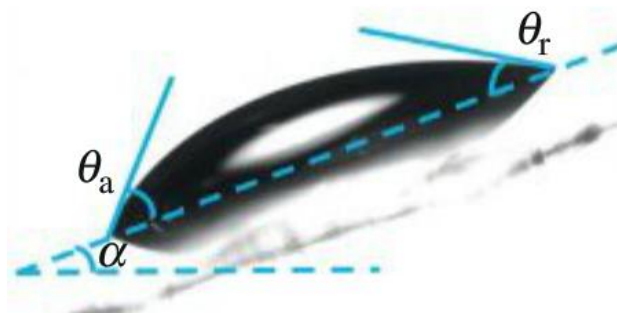
Obrázek 15: Kontaktní úhel smáčení [18]

Úhel smáčení může být ovlivněn například adsorpcí látek z plynné fáze, různými ději probíhajícími na rozhraní tuhá látka-kapalina (chemické reakce, rozpouštění, botnání), hysterezí úhlu smáčení, drsností a nehomogenitou povrchu.

V případě, že je součet povrchové energie kapaliny a mezifázové energie pevná látka- kapalina menší než povrchová energie pevné látky, tak se kapalina takzvaně rozestře rovnoměrně po povrchu a tento jev se nazývá rozestírání.

### 2.3.1.1 Hystereze úhlu smáčení

Jedná se o rozdíl úhlů smáčení takzvaného úhlu postupujícího ( $\theta_a$ ) a úhlu ustupujícího ( $\theta_r$ ), tento rozdíl může být až  $50^\circ$ . Hystereze kontaktního úhlu smáčení bývá někdy označována za míru nehomogenity povrchu. [19]



Obrázek 16: Hystereze úhlu smáčení [19]

## 2.4 Drsnost povrchu

Drsnost charakterizuje nerovnosti na povrchu materiálu vzniklé při výrobě, vzniku nebo strojním obrábění materiálu. Tato vlastnost úzce souvisí s dalšími charakteristikami povrchu, jako je koeficient tření. Dále ovlivňuje tepelnou a elektrickou vodivost a také ovlivňuje těsnost styčných spár důležitou ve strojírenství. Reálná povrchová drsnost nelze plně popsat konečným počtem parametrů, protože se jedná o příliš složitou geometrii, proto bylo nutné zavést určité parametry, aby bylo možné drsnost popsat alespoň částečně.

### 2.4.1 Základní parametry drsnosti

Pro charakterizování drsnosti povrchu existuje několik desítek parametrů (v citovaném textu je jich popsáno celkem 59).

Tyto parametry lze rozdělit do tří základních skupin a těmi jsou parametry amplitudové, distanční a hybridní.

### 2.4.1.1 Parametry amplitudové

Parametry amplitudové jsou nejdůležitější parametry charakterizující povrchovou topografií. Používají se k měření vertikálních nerovností. Do těchto parametrů patří u nás nejpoužívanější charakteristika drsnosti střední aritmetická úchylka profilu nebo také výška nerovnosti profilu určená z 10 bodů, největší výška nerovnosti profilu a další. [20]

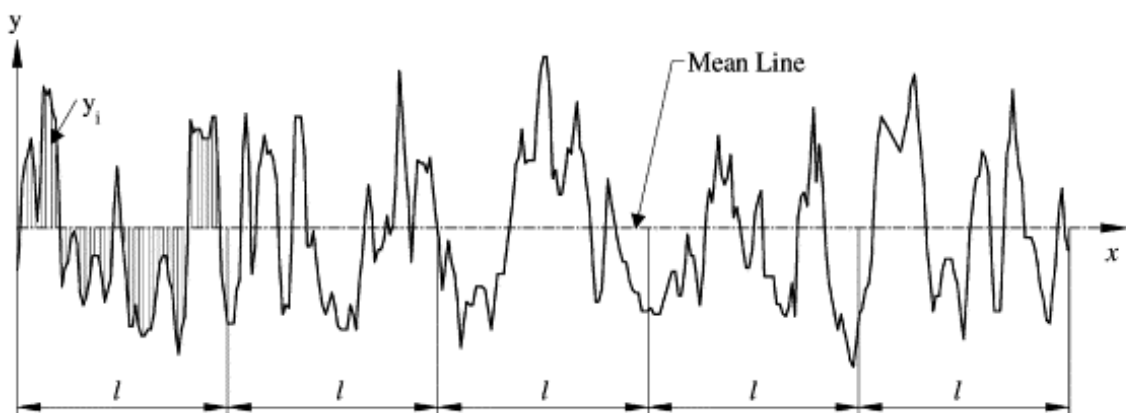
#### *Střední aritmetická úchylka profilu, $R_a$*

Statistická metoda výpočtu:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (2)$$

Integrální metoda výpočtu:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (3)$$



Obrázek 17: Schématické znázornění geometrie povrchu v řezu, výpočet  $R_a$  [20]

Kde:

$l$  je základní délka,  $y$  vyjadřuje výšku nerovností od střední čáry,  $n$  je počet nerovností

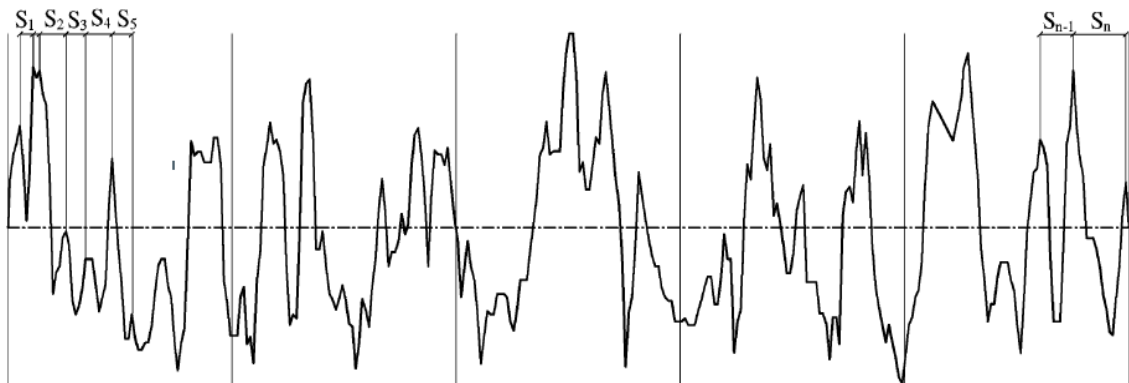
### 2.4.1.2 Distanční parametry

Tyto parametry jsou používány k určení horizontálních charakteristik povrchových nerovností. Jsou užitečné například při lisování plechů, kde se podle nich určuje potřebná lubrikace pro zamezení tvorby škrábanců nebo nežádoucí struktury plechu. Řízením těchto para-

metrů lze získat rovnoměrnější povrchové úpravy při lakování nebo pokovení. Z těchto parametrů se používají například střední rozteč nerovností profilu, střední rozteč místních výstupků profilu.

#### *Střední rozteč místních výstupků profilu, $S$*

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n S_i \quad (4)$$



Obrázek 18: Schématické znázornění geometrie povrchu v řezu, výpočet  $S$  [20]

Kde:

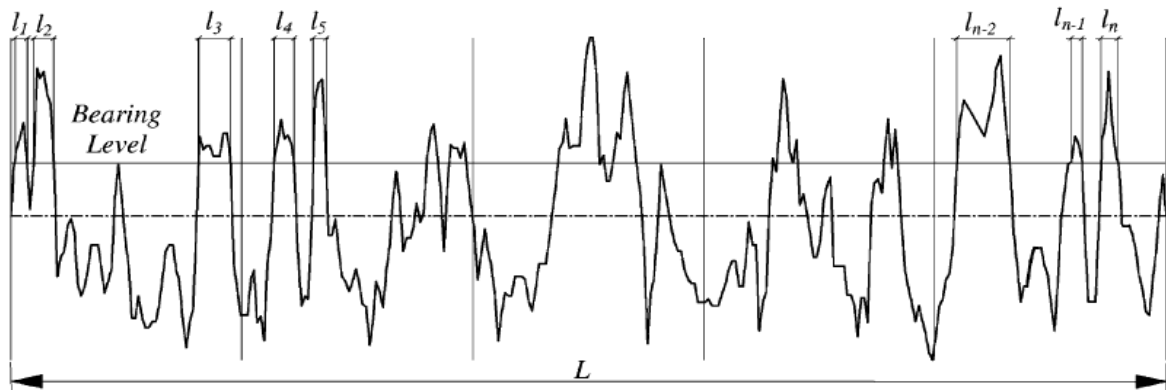
$S_i$  je vzdálenost vrcholů lokálních píků,  $N$  je počet lokálních píků

#### **2.4.1.3 Hybridní parametry**

Tyto parametry vznikají kombinací parametrů amplitudových a parametrů distančních. Faktory, které jsou popisovány těmito parametry, ovlivňují tribologické vlastnosti povrchu. Tribologie je věda zabývající se třením, opotřebením a mazáním. Mezi hybridní parametry patří například často používaný nosný podíl profilu. [20, 21]

#### *Nosný podíl profilu, $t_p$*

$$t_p = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n l_i \quad (5)$$



Obrázek 19: Schématické znázornění geometrie povrchu v řezu, výpočet  $t_p$  [20]

Kde:

$L$  je měřená vzdálenost,  $l_i$  je šířka nerovností vyšších než určená úroveň

## 2.5 Koeficient smykového tření

Obecně je koeficient smykového tření definován jako poměr třecí síly a síly kolmé (normálové) působící mezi tělesy při smykovém tření. Existují dva typy tohoto koeficientu a to statický a dynamický.

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad (6)$$

Kde:

$\mu$  je koeficient smykového tření,  $F_t$  je třecí síla a  $F_n$  je síla normálová

### 2.5.1 Statický koeficient smykového tření

Jedná se o poměr síly potřebné k tangenciálnímu oddělení dvou povrchů a síly působící kolmo na tyto povrchy. Zjednodušeně jde o poměr těchto sil v momentě, kdy se těleso dostane do pohybu.

$$\mu_s = \frac{F_s}{F_n} \quad (7)$$

### 2.5.2 Dynamický koeficient smykového tření

Je vyjádřen jako poměr síly potřebné udržení konstantní rychlosti mezi dotýkajícími se povrchy a síly kolmé. [22]

$$\mu_d = \frac{F_d}{F_n} \quad (8)$$

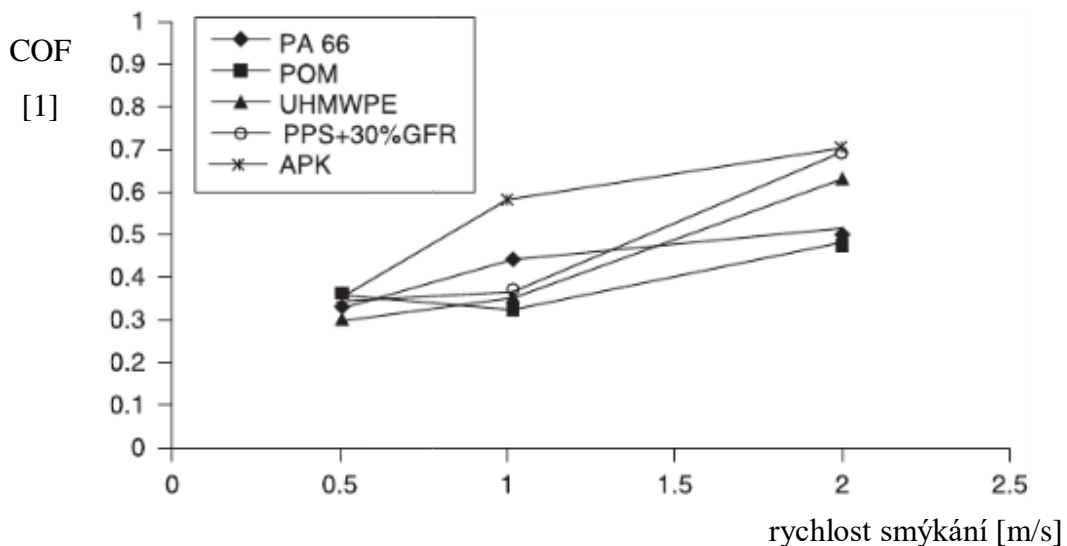
### 2.5.3 Faktory ovlivňující koeficient smykového tření

Velikost koeficientu smykového tření, závisí především na drsnosti styčných ploch, rychlosti smýkání, jejich vzájemné přilnavosti, velikosti přítláčné síly a také vlastnostech polymerů, které jsou ve smykovém kontaktu.[23, 24]

#### 2.5.3.1 Vliv rychlosti smýkání

Vliv rychlosti posuvu na koeficient smykového tření úzce souvisí s teplotou. Výrazný vliv je pozorován v případě, kdy se jeho teplota blíží skelnému přechodu a také u vysokých rychlostí posuvu. Problém může nastat při hodně vysokých rychlostech, kdy může docházet k výraznému zahřívání povrchu termoplastu a jeho změnám. Při rychlostech používaných při běžném měření k výraznému zahřívání nedochází ani se teplota polymeru neblíží skelnému přechodu. Proto může být tento vliv zanedbán. U velmi vysokých rychlostí smýkání je vliv této rychlosti na koeficient smykového tření pro některé polymery uveden v grafu č. 1.

Graf 1: Vliv rychlosti smýkání na koeficient smykového tření [24]



#### 2.5.3.2 Vliv mezifázové drsnosti

Koeficient smykového tření závisí také na topografii obou povrchů, které jsou při tření v kontaktu, tedy i na jejich drsnostech. S klesající hodnotou drsnosti klesá i koeficient smykového tření až do určité minimální hodnoty drsnosti  $R_a$ . Při překročení této hodnoty začnou mezi polymery převládat adhezní síly a koeficient tření vzroste.

### 2.5.3.3 Vliv zatížení a přitlačné síly

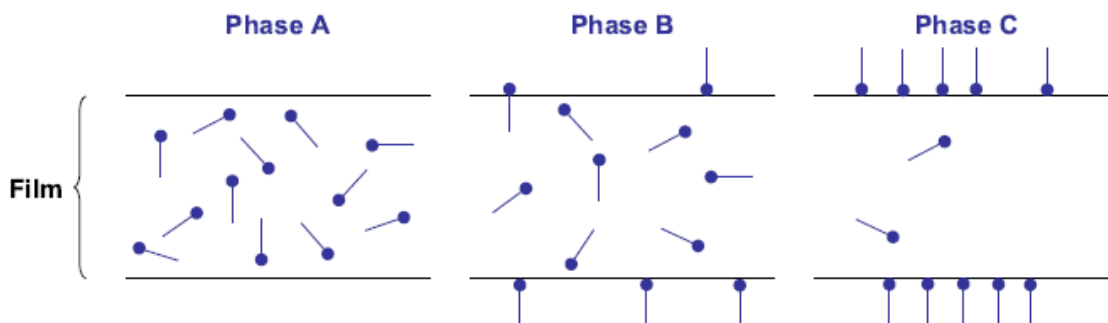
Mechanismus tření a opotřebení polymerů závisí na přitlačné síle, ovšem koeficient tření je poměr mezi přitlačnou silou a silou potřebnou k posuvu, tudíž by měl být konstantní při změně přitlačné síly. Při zatíženích v rozmezí 10 – 100N je koeficient tření opravdu konstantní, ale při nižších zatíženích (0,02 – 1N) se vlivem pružné deformace nerovností, mění mechanismus posuvného procesu, což zapříčiňuje růst koeficientu tření. [24]

### 2.5.4 Snížení COF pomocí kluzných aditiv

Skuz a kluzné vlastnosti polymerů (folií) vycházejí z koeficientu tření a popisují, jak dobře se po sobě pohybují dva povrchy. V případě vysokého koeficientu tření ke skluzu nedochází a folie mají tendenci se na sebe lepit a jakákoliv manipulace s folií je složitější. Výsledkem vysokého COF, tudíž nízkého nebo žádného kluzu folií, může být nutnost snížení rychlosti linky nebo také zvrásnění výsledné folie. Oba důsledky jsou nežádoucí, proto se do vytlačované směsi přidávají tzv. kluzná činidla, která lze rozdělit do dvou základních skupin.

- migrativní
- nemigrativní

Migrativní kluzná aditiva jsou nejběžněji používané. Do polymerního substrátu musejí být přidány ve větším množství, než je limit rozpustnosti. Kluzná činidla obsahují část rozpustnou v organickém substrátu a část nerozpustnou. Během tavení polymeru dojde k homogenizaci aditiva v objemu (fáze A). Po začátku krystalizace je překročen limit rozpustnosti a kluzná aditiva migrují k povrchu substrátu (fáze B) až do ustálení rovnováhy (fáze C), kdy dochází k tvorbě vrstvy na povrchu folie a COF dosahuje minimální hodnoty. [11]



Obrázek 20: Fáze migrace kluzných aditiv [11]

Typickým zástupcem migrativních kluzných aditiv jsou amidy kyselin. Tyto amidy mohou mít různé strukturální modifikace, které se liší hlavně délkou alifatického řetězce. Nejběžněji



používanými amidy jsou tzv. oleamid a erucamid. Dalším kluzným aditivem může být např. poly-siloxan.

Nemigrativní kluzná aditiva se využívají pouze ve specifických případech a jsou přidávány až na vyrobenou folii. Typickým případem použití těchto aditiv je v případě vysoké lepivosti substrátu nebo jako vnější vrstva vícevrstvé folie.

### 2.5.5 Snížení COF pomocí antiblokačních aditiv

Blokace je povrchový efekt, který souvisí se silou potřebnou k oddělení dvou povrchů (folií) za kontrolovaných podmínek. V případě, že je potřeba vysoké síly k tomuto oddělení, mohou nastat problémy při zpracování vytlačené folie. Například složité rozfukování folie nebo po skladování folie a může být obtížné folie od sebe odlepit (odblokovat). Pro předejití těchto problémů se přidávají antiblokační aditiva, která se rozdělují do dvou základních skupin.

- anorganické
- organické

Anorganické antiblokační aditiva jsou chemicky inertní látky, které mohou migrovat k povrchu a částečně vyčnívat nad jeho úroveň. Tímto se zvýší mikrodrsnot povrchu a tím je dosaženo tzv. distančního efektu (folie jsou mírně oddáleny) a tím je zamezena blokace. Zástupci této kategorie jsou např. silika, křída, kaolín nebo  $\text{CaCO}_3$ .

Přesný mechanismus účinku organických aditiv není zcela vysvětlen, ovšem předpokládá se, že je vytvořena jakási bariérová vrstva na povrchu, která zabraňuje adhezi mezi foliemi.

Antiblokační a kluzná aditiva lze kombinovat a může být tak zvýšen vliv na COF. Není vhodné přidávat velká množství aditiv, protože mohou negativně ovlivnit další operace s foliemi např. laminaci a také jejich mechanické vlastnosti. [11]

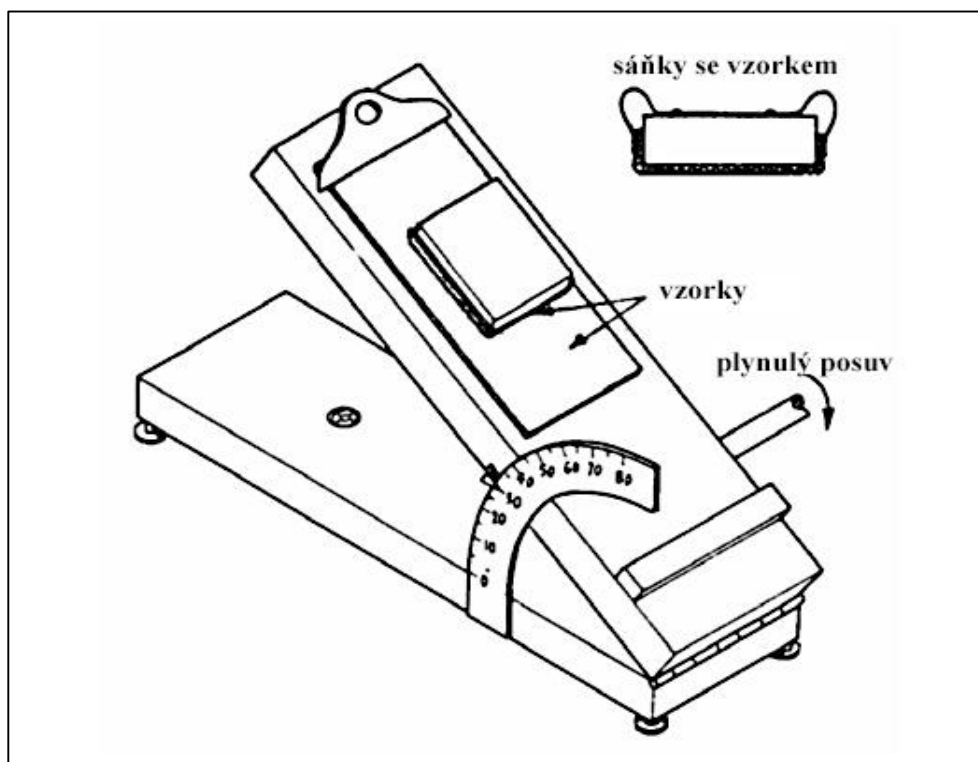
### 3 METODY ANALÝZY POVRCHU

#### 3.1 Měření koeficientu smykového tření

Koeficient smykového tření se měří třemi základními způsoby. První je realizován na nakloněné rovině s nastavitelným úhlem náklonu. Druhý způsob využívá síly, která působí na sáňky s upevněným vzorkem ve vodorovném směru. Třetí způsob využívá geometrii kyvadla. [25, 26, 27]

##### 3.1.1 Nakloněná rovina

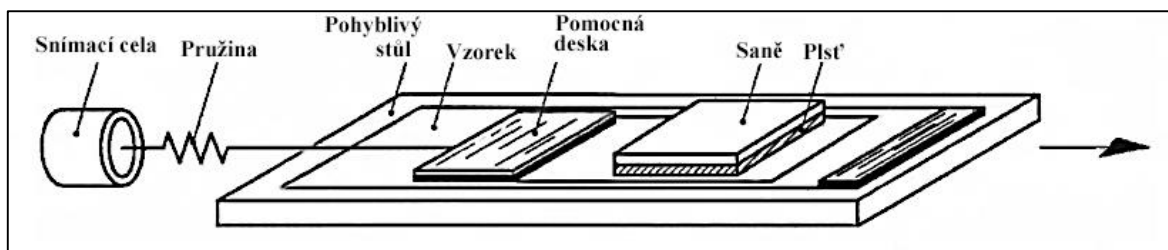
Tato geometrie zkušebního zařízení je založena na plynulé změně náklonu původně vodorovné plochy až do okamžiku, než se sáňky s připevněným vzorkem nezačnou pohybovat. V okamžiku uvedení sání do pohybu byla překonána třecí síla působící mezi vzorky a tangens úhlu, který svírá deska s vodorovnou plochou. To odpovídá statickému koeficientu tření. Dynamický koeficient tímto způsobem měřit nelze, ovšem výhoda tohoto uspořádání je jednoduchost konstrukce. [25]



Obrázek 21: Nakloněná rovina pro měření koeficientu tření [25]

### 3.1.2 Vodorovná deska

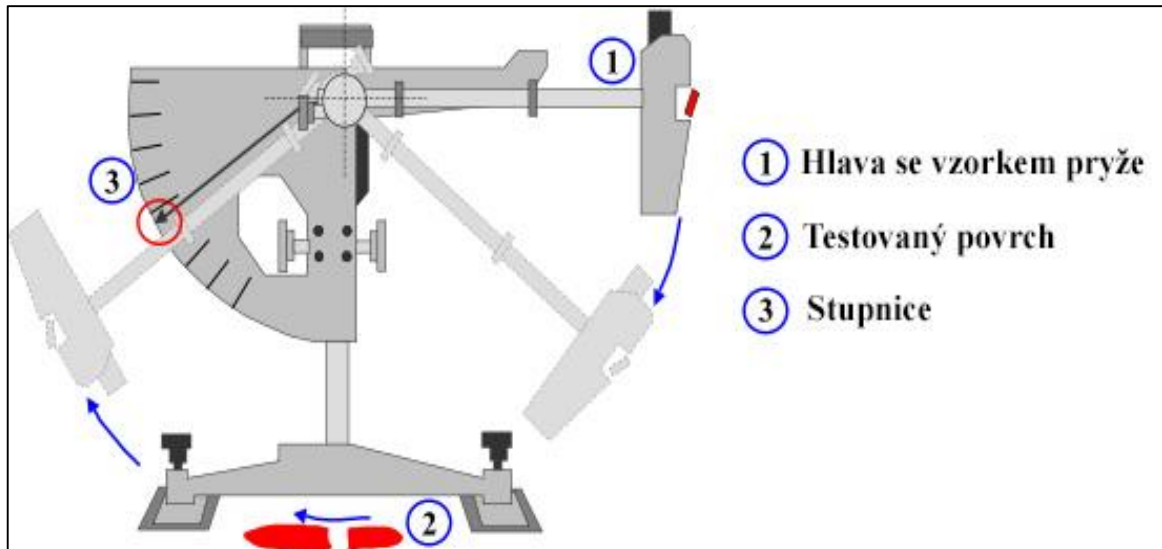
Geometrie je založena na pohybu sáněk po vodorovném stole. Do pohybu může být uveden buď stůl samotný, sánky nebo také lze rozpohybovat obě části současně. Na obrázku č. 4 je zobrazena geometrie, kdy se smýká vzorek po vodorovném stole pohybem tohoto stolu. Další způsob vyvození třecí síly je například použití multifunkčního trhacího stroje přes desku opatřenou kolem s vrubem, které převádí vertikální pohyb stroje v horizontální, a jako měřící zařízení slouží citlivá hlava trhacího stroje. [22]



Obrázek 22: Vodorovný zkušební stůl [22]

### 3.1.3 Kyvadlové testovací zařízení

Tento typ zařízení byl odvozen od Charpyho kladiva pro měření rázové houževnatosti. Přístroje tohoto typu se používají především k určování bezpečnosti povrchů, jako jsou podlahy, vozovky a jiné povrchy, na kterých by mohl být nízký nebo naopak vysoký koeficient tření nežádoucí. Pro toto měření se používá několik typů jednotek. Může se použít samotný koeficient tření nebo také jednotka, která se nazývá koeficient skluzu a vyjadřuje převrácenou hodnotu koeficientu smykového tření, tudíž vyjadřuje jak moc je materiál kluzký. Existuje také jednotka PTV (pendulum test value) používaná v Británii pro měření bezpečnosti podlah. Tato jednotka souvisí s pravděpodobností uklouznutí. V české normě ČSN 74 4505 se pro tuto metodu uvádí například jednotka vychýlení kyvadla. Touto metodou lze měřit pouze dynamický koeficient smykového tření. [26, 27]



Obrázek 23: Kyvadlový testovací přístroj [26]

### 3.1.4 Metoda DCOF AcuTest

Tato metoda byla vyvinuta především pro testování bezpečnosti keramických podlah, poněvadž stávající metody u některých povrchů vykazují značný rozptyl výsledků a bylo potřeba najít spolehlivou metodu. DCOF AcuTest měří především dynamický koeficient smykového tření a využívá k tomu několika senzorů a mazivo. Měření probíhá za řízených podmínek, takže se nedá srovnat se stávajícími metodami, ale pro porovnání jednotlivých dlažeb a jejich kluzkosti za sucha a za vlhka funguje spolehlivě. Proto byla metoda přijata výborem pro akreditované normy ANSI konkrétně pod označením ANSI A137.1 a výrobky pro severoamerický trh musí splňovat atest podle tohoto standardu. V Evropě se touto metodou zabývá pouze jedna zkušebna a o dalším vývoji se prozatím nerozhodlo. Výhoda této metody je v kompaktnosti přístroje (tvar kufru), možnosti použití jak v laboratoři, tak v terénu a jednoduchost samotného měření. Nevýhodou může být mnohem vyšší cena než u používaných metod. [28, 29]

### 3.1.5 Normy pro měření koeficientu smykového tření

Pro výběr vhodné normy, testovacího postupu a přístroje je nejdůležitější měřený materiál. Pro uvedení výrobku na český trh, u kterého je potřeba znát jeho „kluzné vlastnosti“, tedy především koeficient smykového tření a další veličiny s ním související, musí výrobek splňovat platné normy s označením ČSN (česká technická norma). Ovšem pro laboratorní měření lze využít normy TAPPI, americké normy standardu ASTM nebo normy evropského standardu ISO. Odkaz na použitou normu stejně jako odchylky od ní musí být zaznamenány

v protokolu o provedené zkoušce. Následující tabulka obsahuje výčet běžných norem používaných pro měření koeficientu smykového tření a kondicionování měřených vzorků.

Tabulka 3: Běžně používané normy pro měření COF [22, 25, 27, 30, 31, 32]

označení normy	metoda měření	materiály	Kondicionování vzorků		
			teplota [°C]	Čas [h]	relativní vlhkost [%]
<b>ASTM D1894</b>	vodorovná deska	polymerní folie/listy	23±2	>40	50±5
<b>EN ISO 8295</b>			23±2	>16	50±5
<b>ISO 15359</b>		papír a lepenka	23±2	>8	50±5
<b>TAPPI-T 816</b>		dřevovláknité desky	23±1	>16	50± 2
<b>TAPPI-T 549</b>		kancelářský papír	23±1	>4	50± 2
<b>ASTM-D2534</b>		voskové nánosy	23±2	>40	50±5
<b>TAPPI-T 815</b>	nakloněná rovina	obalové materiály	23±1	5-8	50± 2

Na rozdíl od uvedených ASTM standardů je pro TAPPI normy příprava a kondicionování vzorků podrobněji popsáno v samostatných normách s označením TAPPI 400, respektive 402. U normy ISO 1539 je kondicionování popsáno v normě ISO 187:1990.

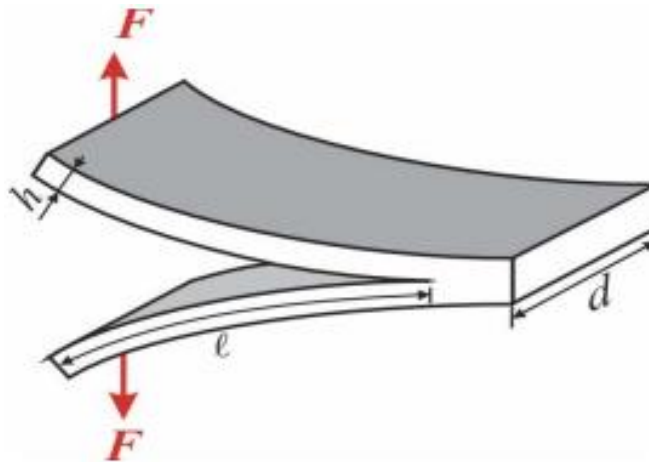
Tyto normy se dále liší velikostí, typem, hmotností sáněk a rychlostí posuvu sáněk. Tyto parametry záleží na bližší specifikace materiálu, jeho tloušťky, popřípadě celkové geometrie. Také bývají v normě uvedeny podmínky samotné zkoušky a u některých materiálů i předkondicionace vzorků, popřípadě kondicionace samotné aparatury. [22, 25, 27, 30, 31, 32]

### 3.2 Měření povrchové energie, napětí

V současnosti neexistuje žádná univerzální, přímá a současně spolehlivá metoda pro určení povrchového napětí, respektive povrchové energie, použitelná pro všechny materiály nebo kapaliny. Bylo objeveno několik nepřímých metod, které jsou používány v závislosti na měřeném materiálu i podmínkách měření. Některé nepřímé i přímé, avšak ne příliš univerzální metody měření povrchové energie a napětí, jsou uvedeny v následující části popřípadě použity v praktické části této práce. [15, 30]

### 3.2.1 Metoda štěpení podle roviny štěpitelnosti

Tato nepřímá experimentální metoda je používána pro křehké tuhé látky s dobrou schopností se štěpit. Takovým materiálem je například slída (monokrystalická). Měří se síla potřebná k rozevírání předem vytvořené trhliny. Měřená síla závisí na délce trhliny, tloušťce a šířce vzorku a povrchové energii. [33]



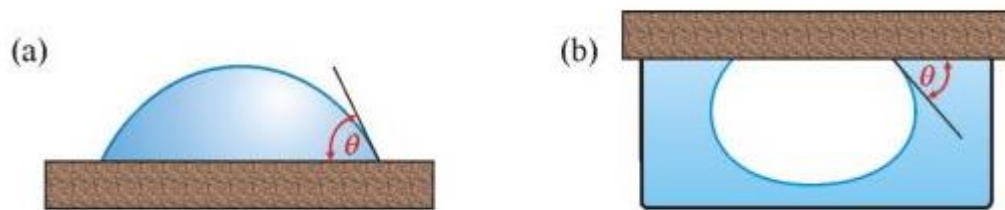
Obrázek 24: Metoda měření povrchové energie štěpením [33]

### 3.2.2 Kontaktní úhel smáčení

Kontaktní úhel smáčení je jednou z mála přímo měřitelných vlastností fázového rozhraní mezi kapalinou a plynem. Metody založené na kontaktním úhlu smáčení spočívají v měření úhlu, který svírá přisedlá kapalina k povrchu pevného tělesa nebo podložky. Toto měření může být různě uspořádáno a může probíhat jak staticky, tak dynamicky a výsledné energie jsou počítány pomocí různých teorií. [33]

#### 3.2.2.1 Metoda přisedlé kapky, přilínající bubliny

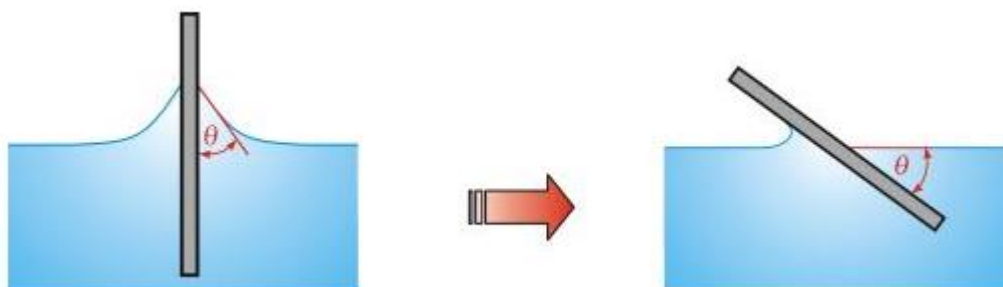
Jedná se o nejpoužívanější přímé statické metody. Používané pro rovné, ploché materiály. Metody jsou velmi jednoduché na měření úhlu smáčení, ovšem je potřeba určité zručnosti a zkušenosti obsluhy a lze dosáhnout přesnosti cca  $1^\circ$  (s moderními technologiemi i méně). V současnosti se používá digitálních goniometrů, které jsou opatřené kamerou, která dokáže vyfotit profil kapky nebo bubliny, a příslušný software vyhodnotí kontaktní úhel smáčení, který je poté použit pro výpočet povrchové energie pevné látky některou z mnoha metod. [33, 34]



Obrázek 25: a) Přisedlá kapka, b) Přilínající bublina [33]

### 3.2.2.2 Metoda naklánění destičky

Metoda naklánění destičky je zástupce přímé dynamické metody měření kontaktního úhlu smáčení. Při tomto měření je vzorek ve formě rovné destičky ponořen do kapaliny kolmo k hladině. Následně je destička nakláněna až do doby, kdy se hladina kapaliny vyrovná (průběh i vyznačený výsledný kontaktní úhel smáčení  $\theta$  je zobrazen na obr. č. 20). Používá se do úhlu  $10^\circ$ . Výsledný úhel odpovídá úhlu mezi postupujícím a ustupujícím úhlem (viz část 3.2.1).



Obrázek 26: Metoda měření kontaktního úhlu, naklánějící se destička [33]

### 3.2.2.3 Metoda vyvažování Wilhelmyho destičky

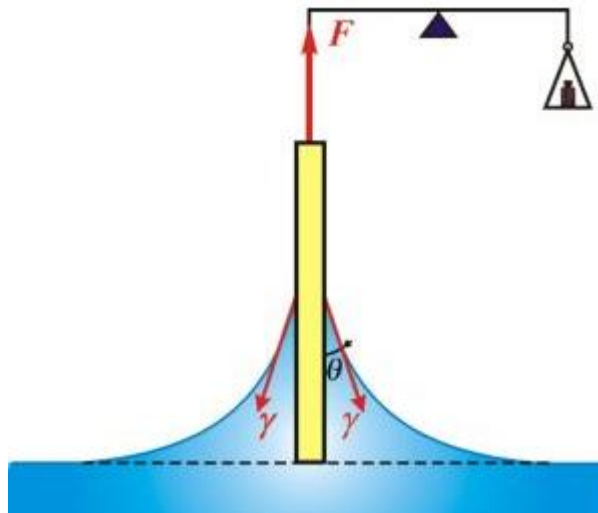
Jde o nepřímou statickou metodu založenou na vyvažování rovné svislé destičky ponořené do kapaliny. Hmotnost je měřena velmi citlivými vahami a přepočítávána na sílu.

Pro destičku ponořenou do úrovně tzv. klidového rozhraní (obr. 22) platí následující rovnice:

$$F = O \cdot \gamma \cdot \cos \theta \quad (9)$$

Kde:

$F$  je síla vzniklá přilnutím kapaliny,  $O$  je obvod destičky. [33]



Obrázek 27: Měření kontaktního úhlu pomocí Wilhelmyho destičky [33]

### 3.2.3 Použití inkoustů nebo fixů

Měření povrchové energie pomocí fixů i inkoustů spočívá v postupném nanášení inkoustů (pufrů) o předem známé hodnotě povrchovém napětí. V případě, že nanesená linka do dvou sekund po nanesení začne tvořit kapky, je třeba nanést inkoust (použít fix) s nižší hodnotou povrchového napětí. Pokud další inkoust do dvou vteřin nezačne tvořit kapky, jeho hodnota povrchového napětí je stejná nebo nižší než povrchová energie testovaného materiálu s přesností zpravidla na 1 mN/m (rozestupy mezi jednotlivými inkousty jsou 2 mN/m).

Tato metoda se využívá v průmyslové praxi, kde je kladen důraz na povrchovou energii materiálu kvůli následným úpravám, jako je potiskování nebo nanášení vrstev.

Výhody této metody jsou rychlost samotného měření a jeho vyhodnocení s vysokou přesností. Některé inkousty jsou spolehlivé i na drsných a tmavých površích. Lze vytvořit vysoký rozsah povrchových napětí (Acrotest od 18,4 do 105 mN/m). Fixy na rozdíl od inkoustů mají nižší spotřebu látky, jednodušší použití, ale mohou být snadno kontaminovány nebo špatným uzavřením látka vyschne. [35]

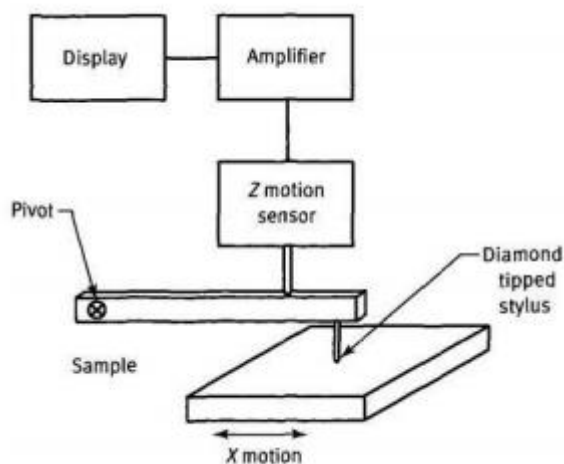


### 3.3 Profilometrie

Profilometrem je označováno zařízení určené k měření profilu povrchu, které je následně využito k určení drsnosti, tvaru povrchových struktur nebo také tloušťky deponovaných vrstev. Rozlišení se liší podle směru pohybu hrotu a jeho velikosti. Svislé rozlišení může být v řádu nanometrů. Vodorovné je menší v řádu desítek nanometrů až desítek mikrometrů.

#### 3.3.1 Kontaktní profilometrie

Kontaktní profilometrie je metoda analýzy morfologie povrchu. Poněvadž při měření dochází ke kontaktu hrotu s měřeným povrchem, používá se přitlačná síla v řádu setin až desítek miligramů. Přitlačná síla závisí na měřeném materiálu a jeho tvrdosti. Podstatou měření je pohyb hrotu po vzorku. Může se také pohybovat stolek, na kterém je vzorek umístěn a hrot zůstává statický. Metoda je hojně využívána pro svoji jednoduchost. [36]



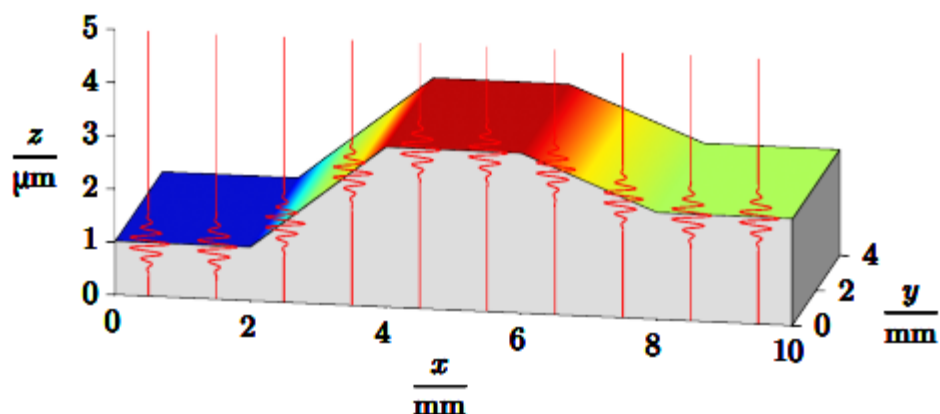
Obrázek 28: Schéma kontaktního profilometru [37]

#### 3.3.2 Optická profilometrie

Jedná se o bezkontaktní metodu zkoumání morfologie povrchu pomocí optických technologií, například tzv. laserová triangulace, konfokální mikroskopie, nízko koherentní interferometrie nebo digitální holografie. Přístroj může být opatřen mechanickým i optickým senzorem zároveň. [38]

### 3.3.2.1 Interferometrie nízké koherence

Pro měření profilu povrchu se používá tzv. interferometrie nízké koherence známá jako LCI (low-coherence interferometry) nebo také WLI (white light interferometry), což označuje tzv. bílou interferometrii. Tato metoda využívá krátké koherenční délky použitého zdroje a dochází k interferenci při malých rozdílech optických drah. Kromě měření profilu povrchu lze využít i při měření drsnosti povrchu nebo měření tloušťky velmi tenkých vrstev. Jako zdroj záření s krátkou koherenční délkou může být použita halogenová, xenonová lampa nebo také LED (light-emitting diode). Metoda WLI může být kombinována s laserovou interferometrií pro měření profilu povrchu. Samotné měření profilu povrchu spočívá v tom, že je pro každý bod detektoru nalezen střed interferenčního proužku a ten odpovídá poloze povrchu vzorku. K měření profilu povrchu se může tato metoda kombinovat s interferometrií laserovou, která se vyznačuje velkou koherenční délkou, tudíž dochází k interferenci i u větších rozdílů optických drah. [39, 40]



Obrázek 29: Princip měření povrchu interferometrií nízké koherence [39]

## 3.4 Mikroskopie

### 3.4.1 Optická mikroskopie

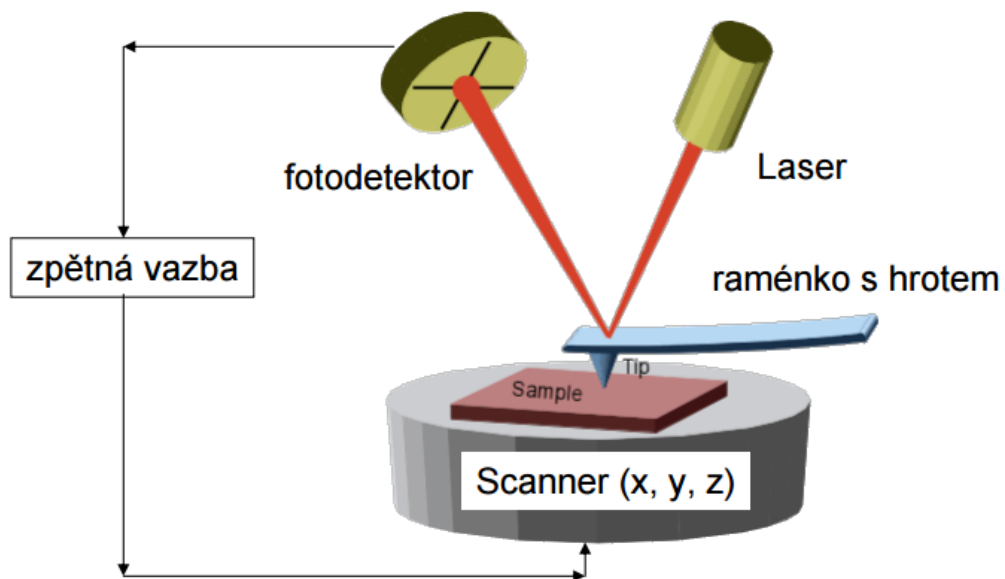
Optická mikroskopie je zobrazovací metoda využívající k zobrazení viditelnou část spektra (420 -720 nm). Využívanou oblastí vlnových délek je dána také maximální rozlišovací schopnost optické mikroskopie na úrovni 0,2  $\mu\text{m}$  (cca 1000 krát zvětšení). Obecně platí, že nelze rozlišit dva body bližší než je polovina vlnové délky použitého záření. [41]

### 3.4.2 Elektronová mikroskopie (SEM)

Jde o mikroskopickou metodu rastrování povrchu pomocí elektronového svazku primárních elektronů urychlených mezi katodou a anodou. Primární elektrony jsou nejčastěji tvořeny přímo žhaveným wolframovým vláknem. Urychlený svazek dále postupuje přes soustavu elektromagnetických čoček, které mají za úkol co nejvíce zmenšit průměr svazku. Za těmito čočkami se nachází čočky vychylovací, které zprostředkují rastrování povrchu. Rozlišovací schopnost tohoto mikroskopu s wolframovým vláknem je mezi 10 – 15 nm. Výsledný signál pro rekonstrukci povrchu pochází ze sekundárních elektronů a také z odražených primárních elektronů. Sekundární elektrony jsou elektrony vyražené primárním svazkem z atomů povrchu zkoumaného materiálu. Nevýhoda této metody je nutnost vodivého povrchu materiálu, proto je potřeba vzorky pokovovat tenkou vrstvou kovu. Další nevýhodou je potřeba vysokého vakua v tubusu mikroskopu. Výhoda proti optickému rozlišení je vyšší rozlišení a větší hloubka ostrosti. [42]

### 3.4.3 Mikroskopie atomárních sil (AFM)

Tato mikroskopická metoda umožňuje trojrozměrné zobrazování povrchu. Stejně jako u SEM dochází k rastrování povrchu, ovšem v tomto případě pomocí sondy a lze dosáhnout velmi vysokého rozlišení. Pomocí této metody můžeme též dospět ke tvorbě nanostruktur nebo zpracování povrchu v rozměrech nanometrů.



Obrázek 30: Princip AFM [41]

Měření může probíhat ve třech módech. Pro měkké materiály se používá tzv. bezkontaktní mód. Hrot se pohybuje v těsné blízkosti povrchu vzorku, kde působí přitažlivé síly (síly Wan der Waalsovy, magnetické a elektrostatické síly). Podle měřené odezvy se může dělit AFM na další skupiny. Další možností měření je mód kontaktní, kdy je udržován konstantní ohyb ramena (mikro pružiny) s hrotem. Pomocí tohoto módu lze dosáhnout až atomárního rozlišení (v řádu desetin nanometrů) pro tvrdší materiály. Mezi těmito módy se používá ještě mód pokleповý, který spočívá v rozechvění raménka pomocí piezorezonátoru. Nevýhoda pokleповého módu je nižší rozlišení a výhodou je eliminace střižných sil vznikajících v módu kontaktním. [43, 44]

## 4 POVRCHOVÉ ÚPRAVY PLASTŮ

Povrch a jeho stav ovlivňuje životnost, spolehlivost i využitelnost materiálu. Povrchové úpravy se tedy významně podílí na výsledné jakosti výrobku a lze jimi docílit dalších funkčních vlastností materiálu, vylepšit vlastnosti stávající nebo změnit vlastnosti podle požadovaného použití, například lze změnit vzhled plastu z důvodů dekorativních. Celý proces povrchových úprav se skládá z předúpravy povrchu a následně samotné úpravy. [45]

### 4.1 Předúpravy povrchu

V průmyslu je často potřeba plasty buď spojovat, k tomu je potřeba, aby lepidlo kvalitně přilnulo k povrchu, nebo je potřeba upravovat povrch plastů potiskem, nátěrem nebo nánosem jiného materiálu. Kvůli obvykle špatným adhezním vlastnostem plastů, které jsou následkem nízké povrchové energie plastů, je nutné materiál tzv. předupravit, aby byla povrchová energie vyšší než povrchová energie lepidla, nátěru, potiskovací barvy nebo nánosu. Předúpravám z důvodů zvýšení adheze se také říká aktivace povrchu.

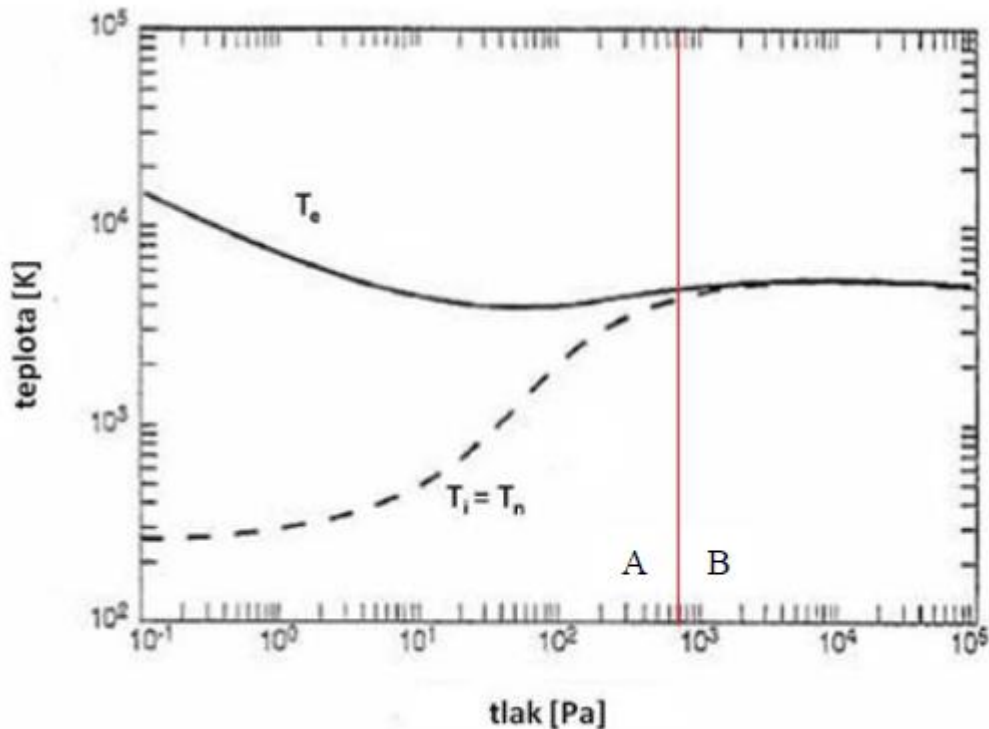
#### 4.1.1 Koronová předúprava

Koronová předúprava se používá jak pro plasty, tak také pro kovové materiály ke zlepšení adhezních vlastností. Materiál, u kterého je potřeba zvýšit povrchovou energii, je vystaven koronovému výboji. Během působení korony dochází k rozštěpení kyslíku na volné atomy a ty jsou navázány na předupravovaný povrch. Hlavní nevýhodou této předúpravy je, že předupravený povrch má vyšší náchylnost k znehodnocení, pokud není dále upravován. Správné skladování může životnost předúpravy výrazně prodloužit. Výhoda této předúpravy je, že probíhá při atmosférickém tlaku. [46]

#### 4.1.2 Plazmová předúprava

Plazmu lze definovat jako částečně ionizovaný plyn, který obsahuje kladné i záporné ionty, ale také částice neutrální. Pokud je použit proud těchto částic na povrch materiálu, jedná se o plazmovou předúpravu. Plazmovou předúpravu je možné rozdělit podle teploty plazmatu a podle této teploty jsou také používány na úpravu jednotlivých materiálů. Nízkoteplotní plazmat (nerovnovážný nebo neizotermní) obsahuje elektrony, které mají teplotu řádově  $10^4$

K, ale také neutrální částice, které dosahují teploty 300 K. Vzhledem k tomu, že nízkoteplotní plazma vyžaduje velmi nízkého tlaku (viz. obr. 27), je koncentrace elektronů také nízká, proto dosahuje teplota tohoto plazmatu cca pokojové teploty.



Obrázek 31: Tploty plazmatu (A- nízkoteplotní, B- vysokoteplotní) [47]

Vysokoteplotní plazma (rovnovážné nebo izotermní) obsahuje minimum neutrálních částic a jeho teplota dosahuje přes 10<sup>7</sup> K. Vysokoteplotní plazma se vyskytuje pouze ve hvězdách, kde dochází k fúzi atomů vodíku za vzniku atomů helia. V pozemských podmínkách se vytváří velmi složitě například jaderným výbuchem. [46, 48]

#### 4.1.2.1 Využití nízkoteplotního plazmatu

Nízkoteplotní plazmou lze předupravovat velmi malá povrchová vrstva bez ovlivnění vlastností v objemu. Působení plazmatu může vyvolat změnu náboje, povrchové energie, funkčních skupin a také může změnit samotnou topografii povrchu. Při použití správného generátoru lze upravovat prášky, větší objekty nebo folie a desky. Jak bude plazma působit na povrch lze ovlivnit výběrem plynu.

- Kyslík a dusík se používá pro zlepšení smáčivosti (zvýšení povrchové energie).
- Fluorované plyny se používají pro zhoršení smáčení (snížení povrchové energie).
- Uhlovodíky jako je methan, ethan nebo acetylen se využívají pro antireflexní účely.

d) Vzácné plyny jsou používány na očištění povrchu nebo ke zvýšení adheze. Plazmatu lze využít také k plazmovému leptání anebo plazmové polymeraci. [15]

## 4.2 Technologie povlakování

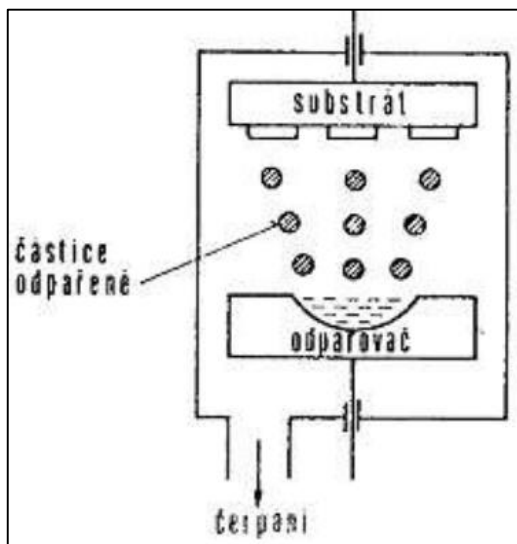
### 4.2.1 PVD povlakování

Povlakováním metodou PVD (Physical Vapour Deposition) lze na povrch plastu nanést vrstvu jak kovu, tak i vysoce odolné keramiky. Předmět, který je potřeba povlakovat, je umístěn do vakuové komory s terčíkem obsahujícím atomy požadovaného nánosu. Podle toho, jakým způsobem jsou atomy povlakujícího materiálu dostávány z terčíku na povrch materiálu povlakovaného (substrátu), můžeme dělit PVD technologii na napařovací nebo napařovací. Takto nanášené vrstvy, mají tloušťku obvykle v řádu mikrometrů. [49, 50]

#### 4.2.1.1 Reaktivní napařování

Spočívá v odpařování materiálu ve vakuu a následné kondenzaci jeho par na substrátu. Samotné odpařování je možné iniciovat těmito způsoby:

- elektronovým svazkem
- obloukovým výbojem
- laserem



Obrázek 32: Princip napařování [49]

#### 4.2.1.2 *Reaktivní naprašování*

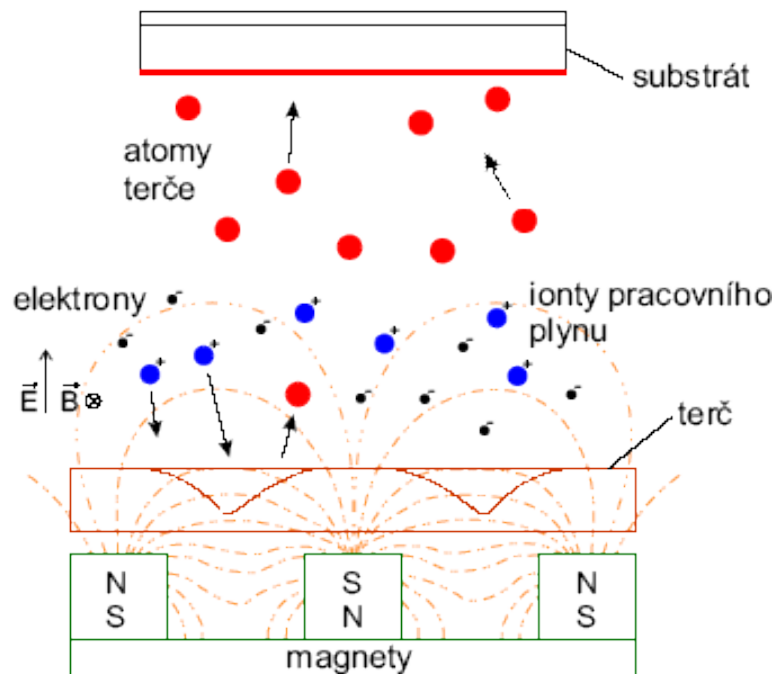
Tato metoda je založena na rozprášení materiálu terče (katody) energetickými ionty a následnou kondenzací částic naprašovaného materiálu na substrátu.

Ionty plynu, které naráží do terče (pracovního plynu) s naprašovanou látkou, jsou urychlovány elektrickým polem. Naprašování probíhá v přítomnosti plazmatu. Toto plazma může ionizovat i pracovní plyn a buď je k tomuto plynu inertní, nebo s ním může reagovat.

Výhody oproti napařování jsou přesnější přenesení terče do naprašované vrstvy, homogenní depozice vrstvy a také výrazně lesklý povrch v případě depozice kovu. [50]

#### 4.2.1.3 *Magnetronové naprašování*

U magnetronového naprašování je princip podobný jako u reaktivního naprašování s tím rozdílem, že poblíž terče se nachází elektromagnet nebo permanentní magnet, který udržuje elektrony plazmatu déle v oblasti terče, a tudíž dovoluje větší ionizaci pracovního plynu a tím i hustší plazma. Touto metodou lze například naprašovat dielektrika a slitinové terče. Výhodou proti reaktivnímu naprašování je vyšší adheze výsledné vrstvy. [50, 51]



Obrázek 33: Magnetronové naprašování [51]



### 4.3 Nánosování vodných disperzí

Technologie chemického nánosování je často používána na úpravu povrchu extrudovaných polymerních folií určených pro potravinářský, papírenský, obalový a polygrafický průmysl. Chemickými nánosy lze dosáhnout lepších vlastností, jako je vyšší tepelná odolnost, lepší antibakteriální chování povrchu, úprava bariérových vlastností, úprava koeficientu smykového tření, zlepšená adheze, úprava povrchové energie, vytvoření antistatických vlastností, atd.

Pro nanášení tenkých vrstev se aplikují různá složení roztoků na vodné bázi. Disperzní fáze bývá často na bázi polyakrylátu, polyesteru nebo polyuretanu a bývá stabilizována proti agregaci.

Nánosy na bázi polyesteru mohou být díky vyšší výsledné povrchové energii ( $60 \text{ mJ/m}^2$  a více) použity jako podklad pro vodou ředitelné barvy. Polyakrylátové nánosy mají povrchovou energii nižší (cca  $40 \text{ mJ/m}^2$ ), proto jsou vhodnější pro barvy rozpouštědlové.

Nevýhodou nánosování vodných polymerních disperzí může být pěnovost při čerpání a nanášení nebo nedostatečná smáčivost povrchu nánosovaného substrátu. Problém nedostatečné smáčivosti lze vyřešit předúpravou povrchu korunou nebo nízkoteplotním plazmatem (viz 4.1). [52]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 ANALÝZA POVRCHU NEUPRAVENÝCH FOLIÍ A ROZTOKŮ NÁNOSOVACÍCH DISPERZÍ

### 5.1 Použité materiály a disperze

#### 5.1.1 BOPET folie

Pro měření povrchových vlastností a následné nanášení byly použity dva typy této biaxiálně orientované PET folie (Fatra a. s.). První typ obsahoval anorganickou antiblokační přísadu (silika), druhý ji neobsahoval. Aditivovaná folie měla tloušťku 150  $\mu\text{m}$ , neaditivovaná folie 100  $\mu\text{m}$ . Pro porovnání byla také měřena folie tloušťky 12  $\mu\text{m}$  opatřená nánosy z výroby se stejnými koncentracemi složek, jako některé z laboratorních nánosů.

Aditivovaná folie obsahuje oxid křemičitý (siliku), který je velmi jemně namletý na velikost částic mezi 2-5  $\mu\text{m}$  a je používán primárně pro zabránění slepení folie při navíjení.

Dalšími přísadami mohou být barevné pigmenty (organické i anorganické), UV stabilizátory, UV absorbéry, matovací přísady, optické zjasňovače, zvýšený obsah glykolů a další. Zvýšení obsahu glykolů může částečně nahradit antiblokační aditiva, protože vzniká na povrchu folie tenká vrstva glykolu, která zabraňuje lepení folie při navíjení. [11]

#### 5.1.2 Primal AC 201 ER

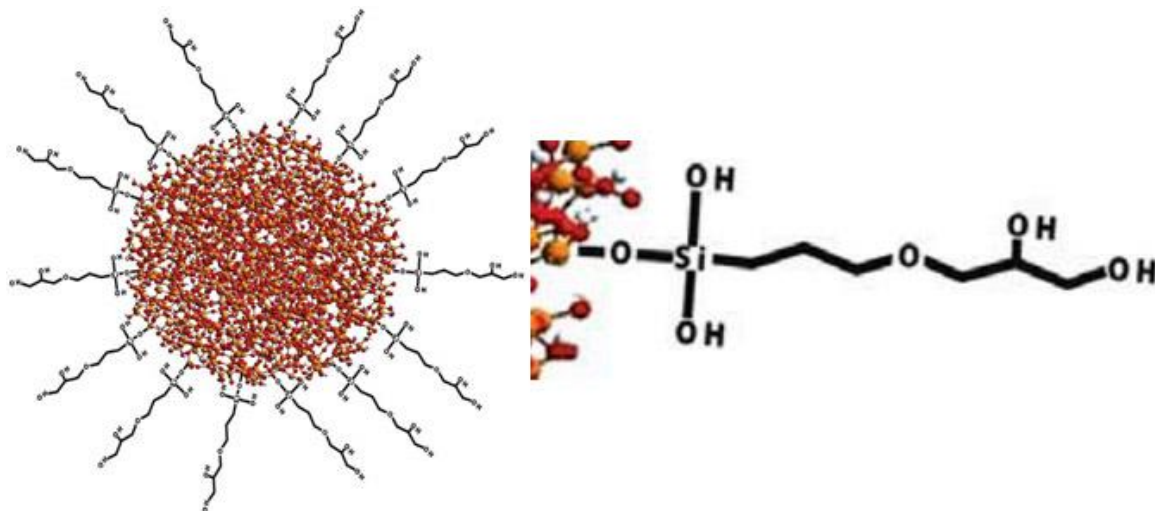
Primal AC je polymerní suspenze (vodná disperze). Látky, které obsahuje, a jejich limitní hodnoty (specifický migrační limit, SML) podle evropské směrnice 2004/19/EC jsou uvedeny v následující tabulce. Specifický migrační limit vyjadřuje maximální množství konkrétní látky, které se uvolní do potravinových simulantů. Tato látka se používá jako nátěrová hmota a z toxikologického hlediska může vyvolat senzibilaci při styku s kůží. [53]

Tabulka 4: Látky obsažené v Primalu AC a jejich maximální povolený SML [53]

Název látky	Specifický migrační limit
Kyselina akrylová a její estery	6 mg/kg
Metakrylová kyselina a její estery	6 mg/kg
Disulfid sodný	10 mg/kg
Formaldehyd	15 mg/kg
Melamin	30 mg/kg
Methakrilamid	0,02 mg/kg (nedetekovatelné)
Triethylamin.	0,05 mg/kg (nedetekovatelné)

### 5.1.3 Bindzil CC

Bindzil je obchodní označení koloidní siliky. Tato látka se používá na nanášení čistých nebo pigmentovaných nánosů nebo jako příměs do silikátových barev. [54]



Obrázek 34: Strukturální model částice bindzilu (CC301), vzorec postranního řetězce [54]

## 5.2 Měření povrchové energie folií

Pro měření povrchové energie byla použita metoda sedící kapky a pro vyhodnocení energií poté teorie OWRK.

### 5.2.1 Teorie OWRK (Owens-Wendt-Rabel-Kaelble)

$$\frac{(1 + \cos\theta) \cdot \gamma}{2\sqrt{\gamma_l^d}} = \sqrt{\gamma_s^p} \cdot \sqrt{\frac{\gamma_l^p}{\gamma_l^d}} + \sqrt{\gamma_s^d} \quad (10)$$

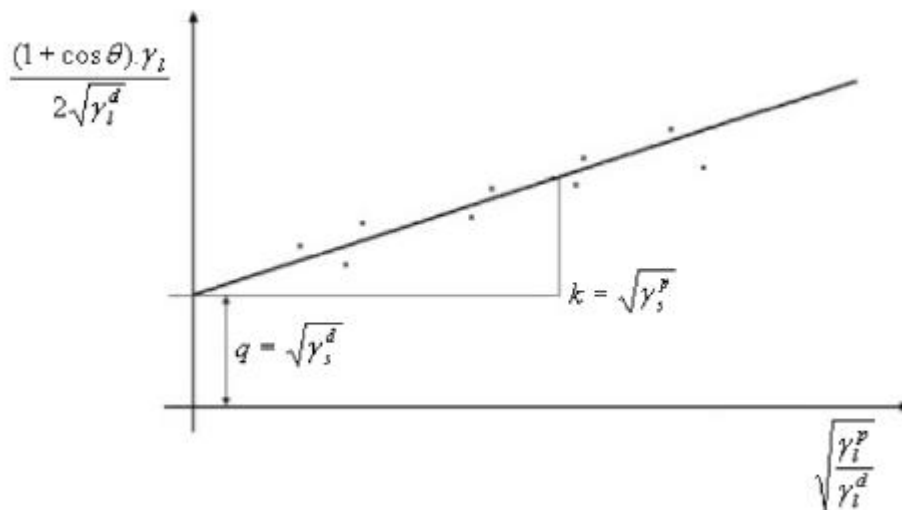
$$\gamma_s = \gamma_s^d + \gamma_s^p \quad (11)$$

Kde:

$\theta$  je kontaktní úhel smáčení,  $\gamma_l^d$  je disperzní složka povrchového napětí kapaliny,  $\gamma_l^p$  je polární složka povrchového napětí kapaliny,  $\gamma_s^p$  je polární složka povrchové energie testovaného povrchu,  $\gamma_s^d$  je disperzní složka povrchové energie testovaného povrchu

Tato teorie je pojmenována podle svých autorů a spočívá v aplikaci nejméně dvou kapalin se známými složkami povrchového napětí na měřený povrch. Kontaktní úhel smáčení a komponenty povrchového napětí kapalin jsou podle rovnice (10) vyneseny v lineárním grafu, ze kterého jsou následně odečteny komponenty povrchové energie pevné látky. Součet těchto

komponent (polární a disperzní složky) poté vyjadřuje celkovou povrchovou energii zkoumaného povrchu. [55]



Obrázek 35: Určení povrchové energie podle OWRK [55]

### 5.2.2 Kondicionování vzorků

Vzorky byly uchovávány v laboratoři, ve které následně probíhalo měření nejméně 48h před začátkem měření. Podmínky v laboratoři byly následující: vlhkost 63%, teplota 22°C a tlak 1010,5 hPa.

### 5.2.3 Zvolené kapaliny

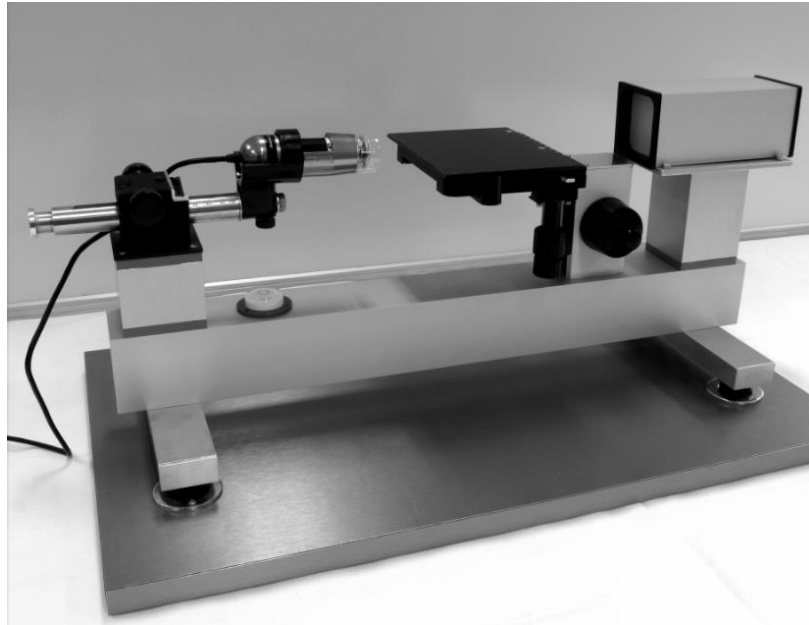
Tabulka 5: Povrchové napětí a jeho složky pro zvolené kapaliny [56]

kapalina	$\gamma_l^d$	$\gamma_l^p$	$\gamma_l$
	[mN/m]		
glycerol	29,00	34,40	<b>63,4</b>
ethylenglykol	18,91	29,29	<b>48,2</b>
voda	21,80	51,00	<b>72,8</b>

Pro následné výpočty a dosazení do grafu byly zvoleny kapaliny glycerol, ethylenglykol a voda. Povrchové napětí a jeho složky pro tyto kapaliny byly použity z rozšířené databáze společnosti Krüss. Kapky měly vždy objem 3  $\mu\text{m}$ .

#### 5.2.4 Přístroje a programy

- Mikropipeta Eppendorf Research
- přenosný laboratorní goniometr sestavený na UFMI UTB

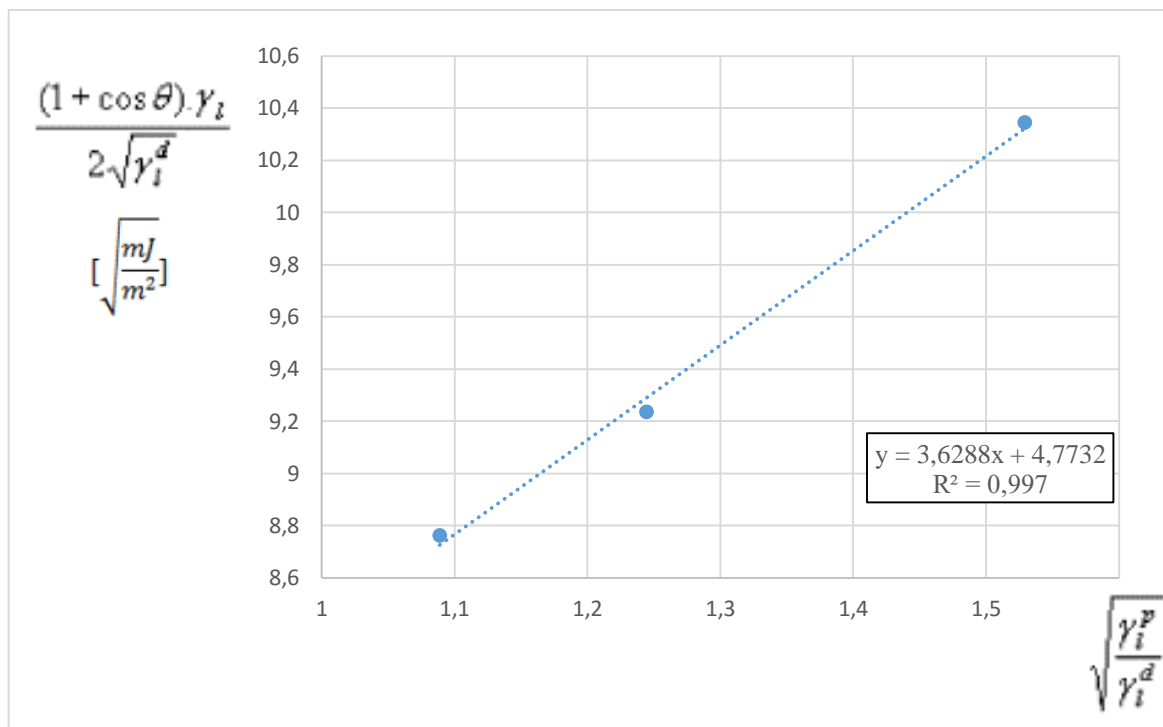


*Obrázek 36: Přenosný laboratorní goniometr*

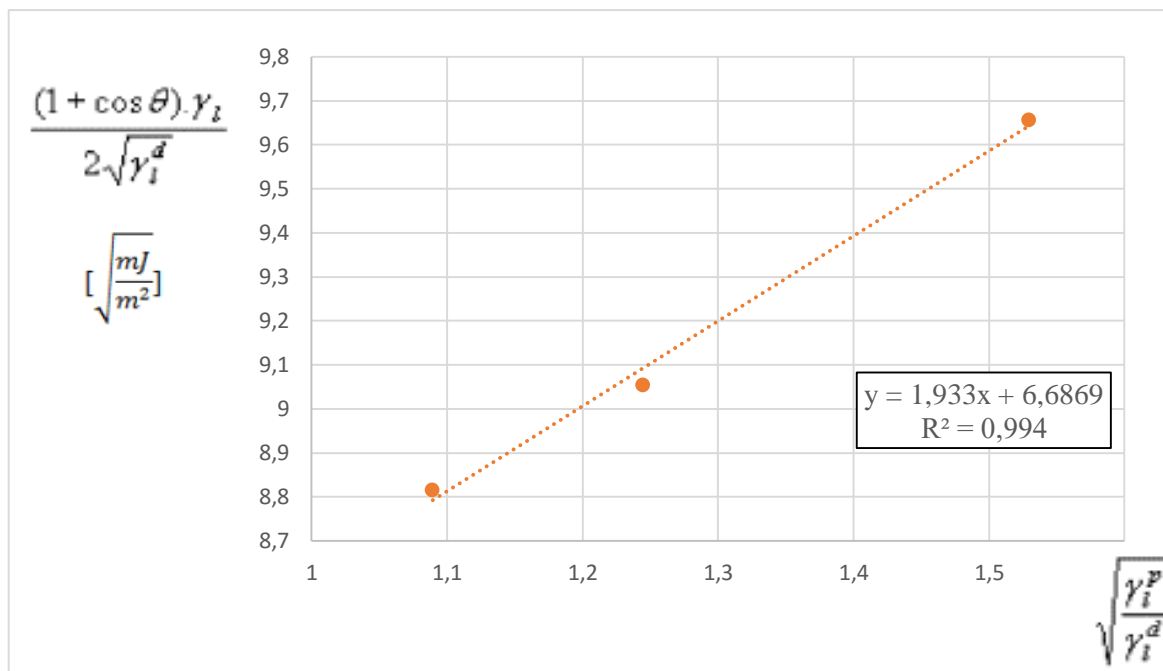
#### 5.2.5 Výsledky

Pro měření povrchové energie obou typů BOPET folií bylo nanášeno 20 kapek (2x10 pro dva různé vzorky též folie) každé kapaliny na povrch čisté folie a byly změřeny kontaktní úhly smáčení pomocí přenosného laboratorního goniometru. Tyto naměřené hodnoty (nacházejí se v příloze P I) byly zprůměrovány a použity pro vyhodnocení metodou OWRK.

Graf 2: Metoda OWRK pro folii se silikou



Graf 3: Metoda OWRK pro folii bez siliky

**Vzorový výpočet povrchové energie z grafu:**

Při výpočtu polární a disperzní složky se vychází z rovnice (10), která vyjadřuje rovnici přímky, a jednotlivé komponenty jsou vypočteny následovně:

$$\sqrt{\gamma_s^d} = k \Rightarrow \gamma_s^d = k^2 = 1,933^2 = 3,74$$

$$\sqrt{\gamma_s^p} = q \Rightarrow \gamma_s^p = q^2 = 6,687^2 = 44,72$$

$$\gamma_s = \gamma_s^d + \gamma_s^p = 3,74 + 44,72 = 48,45$$

Tabulka 6: Povrchové energie BOPET folií

Typ folie	$\gamma_s^d$	$\gamma_s^p$	$\gamma_s$
	[mN/m]		
<b>Bez aditiva</b>	3,74	44,72	<b>48,45</b>
<b>S aditivem</b>	13,17	22,78	<b>35,95</b>

#### Diskuse k výsledkům:

Z těchto výsledků je zřejmé, že aditivum (silika) má vliv na povrchovou energii BOPET folie a to tak, že její obsah ve folii povrchovou energii folie snižuje. Výskyt částic siliky v povrchové vrstvě aditivované folie způsobuje kromě vyšší drsnosti a tvrdosti folie také oddálení PET řetězců a snížení povrchové energie výsledné folie. Tabulková hodnota povrchové energie PET je 44,5 mN/m. V porovnání z naměřené hodnoty je také zřejmé, že biaxiální dloužení pravděpodobně zvyšuje hodnotu povrchové energie.

#### 5.2.6 Měření povrchových energií pomocí inkoustů

Pro porovnání výsledků byla zvolena metoda nanášení inkoustů značky Arcotest. (popis viz. 3.2.3). Byla vybrána sada inkoustů s povrchovým napětím v rozmezí 24-70 mN/m. Výsledné hodnoty z tohoto měření byly pro neaditivovanou folii ( $48 \pm 2$ ) mN/m a pro aditivovanou folii ( $41 \pm 2$ ) mN/m. Pro neaditivovanou folii je výsledek srovnatelný s předchozím měřením, ovšem pro aditivovanou folii se výsledek mírně liší. Tato odlišnost je dána rozdílnými metodami měření (vybrané inkousty byly vyvíjeny spíše pro neplněné folie z PE a PP a jejich povrchové úpravy pomocí korony). Také hraje svoji roli zvýšená drsnost způsobená antiblokačním aditivem (silikou).



### 5.3 Profilometrie (měření drsnosti)

Měření drsností probíhalo na optickém a mechanickém profilometru. Tímto měřením byla porovnávána topografie povrchu obou typů folií a také byla snaha o charakteristiku samotných nánosů. Na optickém profilometru byla měřena plošná (3D) drsnost značena jako  $S_a$  a na mechanickém profilometru byla měřena 2D drsnost značena jako  $R_a$ .

#### 5.3.1 Optická profilometrie

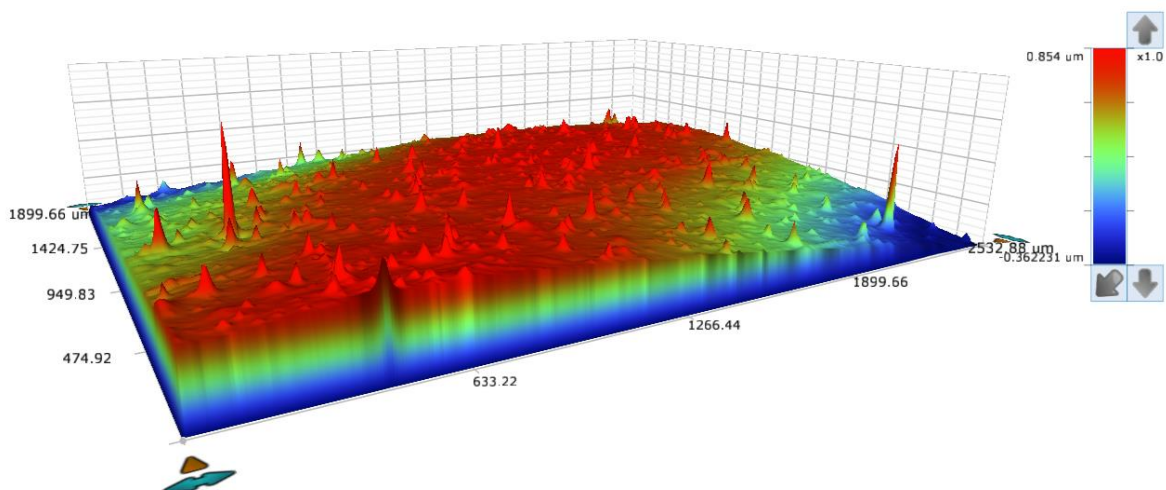
##### 5.3.1.1 Přístroj

- Optický profilometr CONTOURGTK-A (Bruker)
  - udávané rozlišení přístroje: vertikální < 0,01 nm, horizontální < 380 nm
  - zvolený objektiv: parfokální interferometrický 2,5x
  - mód: VXI
  - plocha měření: 2x2 mm

##### 5.3.1.2 Výsledky

- **BOPET bez siliky**

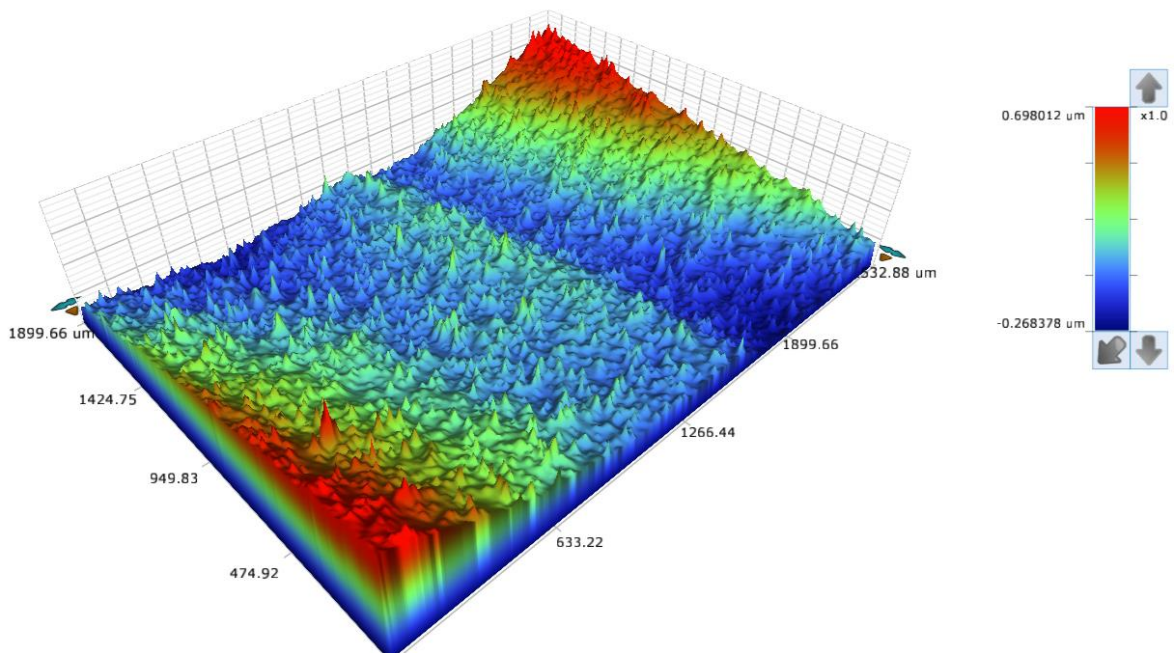
$$S_a = 69 \text{ nm}$$



Obrázek 37: 3D topografie povrchu folie bez siliky, optický profilometr

- *BOPET + silika*

$S_a = 112 \text{ nm}$



Obrázek 38: 3D topografie povrchu folie se silikou, optický profilometr

### Diskuse k výsledkům:

Porovnáním topografie povrchu obou folií optickou metodou bylo potvrzeno, že silika tvoří značné množství výstupků na povrchu folie, což způsobuje nižší hodnoty koeficientu tření díky efektu oddálení povrchů vlivem nerovností. Výsledky z optického profilometru je však třeba brát s jistou rezervou s ohledem na možný vliv nerovnosti samotné měřené fólie, kdy je velmi obtížné udržet fólii v ideální rovině. Výsledky jsou také ovlivněny nastavenými parametry postprocesingu získaných snímků (filtrace vlnitosti a tvaru).

### 5.3.2 Mechanická profilometrie

Vzorek folie byl měřen vždy na třech místech vzdálených nejméně 1 cm od sebe. Směr měření byl shodný se směrem odtahu válců, tudíž i se směrem posuvu při měření COF.

#### 5.3.2.1 Přístroj

- Mechanický profilometr Dektak XT-E (Bruker)
  - stylus:  $2 \mu\text{m}$
  - přítlak: 10 mg
  - udávané rozlišení: vertikální  $< 1 \text{ nm}$

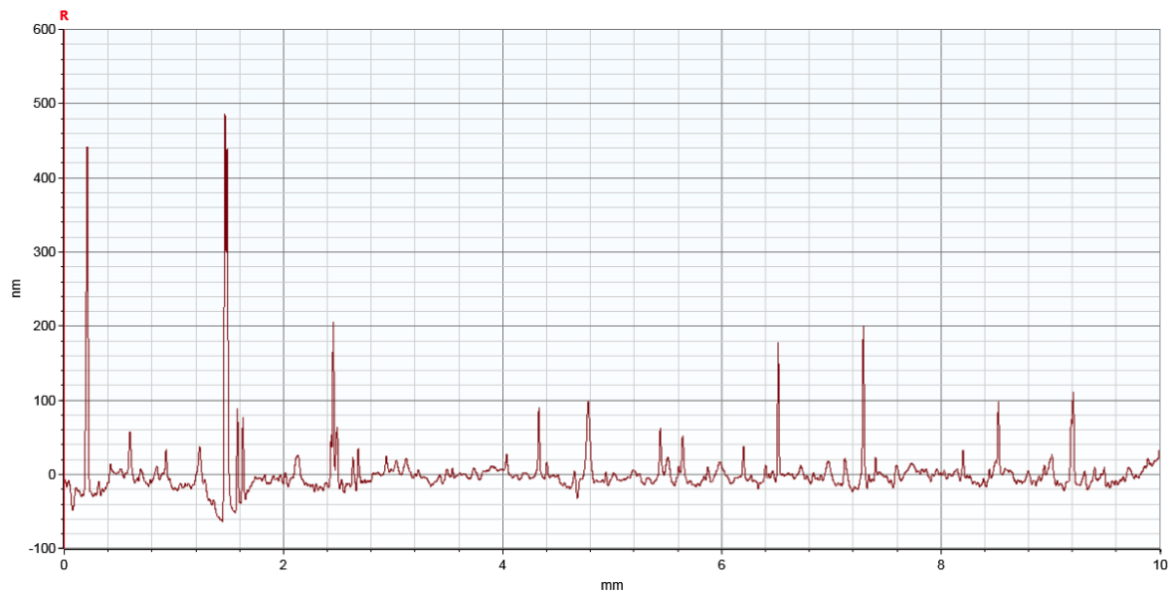
## 5.3.2.2 Výsledky

- *BOPET bez siliky*

Tabulka 7: 2D drsnosti, folie bez siliky

<b>i</b>	<b>R<sub>a</sub> [nm]</b>
1	13,81
2	19,20
3	17,92
<b>průměr</b>	<b>16,98</b>
<b>chyba</b>	<b>1,63</b>

Graf 4: Příklad 2D topografie povrchu folie bez siliky, mechanický profilometr

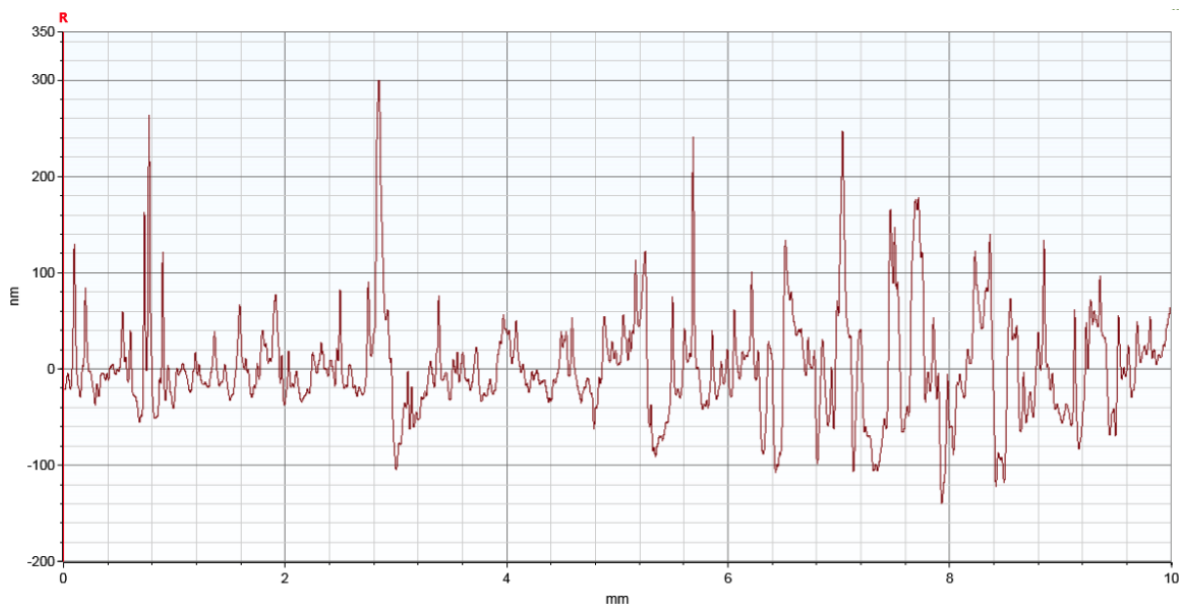


- *BOPET + silika*

Tabulka 8: 2D drsnosti, folie se silikou

<b>i</b>	<b>R<sub>a</sub> [nm]</b>
1	50,53
2	36,75
3	47,2
<b>průměr</b>	<b>44,83</b>
<b>chyba</b>	<b>4,15</b>

Graf 5: Příklad 2D topografie povrchu folie se silikou, mechanický profilometr



### Diskuse k výsledkům:

Měřením na kontaktním profilometru byl potvrzen vliv aditiva (siliky) na změnu povrchové drsnosti BOPET fólie, kdy aditivovaný vzorek má drsnost ( $R_a$ ) téměř 3x vyšší než neaditivovaný.

## 5.4 Měření sušiny zásobních disperzí

Pro následnou přípravu laboratorních roztoků bylo nutné zjistit, kolik sušiny se přesně nachází v dodaných disperzích. Do tří Petriho misek bylo odpipetováno 10 ml zásobních roztoků obou disperzí a zvážené Petriho misky byly umístěny do sušárny. Sušení zásobních roztoků probíhalo v sušárně při teplotě 60 °C.

### 5.4.1 Přístroje a programy

- Analytické váhy Mettler Toledo AB135-S
- Sušárna Memmert UNE 400 53I 250C
- MS excel 2016

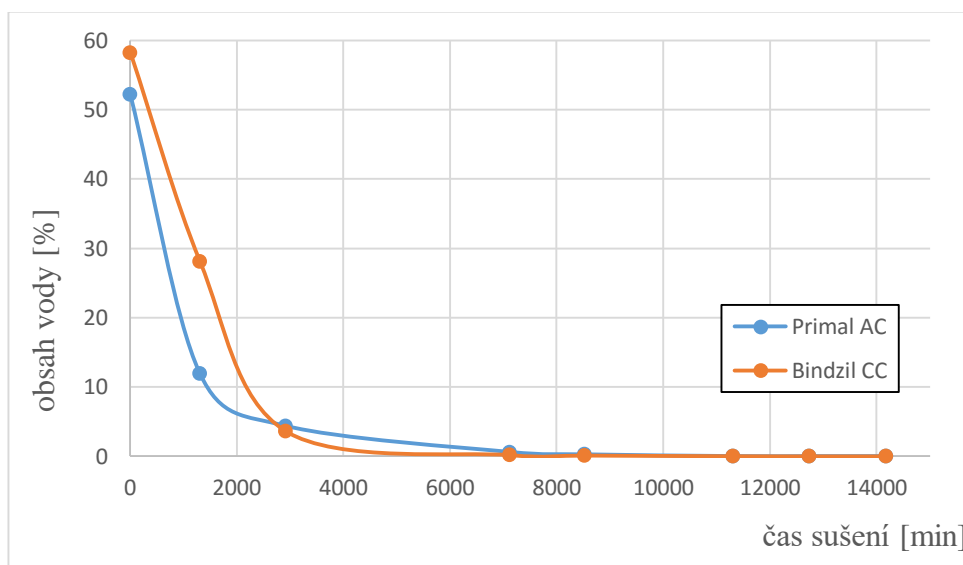
### 5.4.2 Výsledky měření

Tabulka 9: průběh sušení zásobních disperzí primalu a bindzilu

t [min]	m roztok [g]		obsah vody [%]	
	primal	bindzil	primal	bindzil
0	9,733	12,584	52,22	58,26
1305	5,280	7,309	11,93	28,14
2911	4,863	5,451	4,38	3,65
7123	4,678	5,261	0,60	0,17
8519	4,662	5,258	0,26	0,11
11303	4,650	5,253	0,01	0,02
12739	4,650	5,252	0	0
14179	4,650	5,252	0	0

Sušina primalu je  $(47,78 \pm 0,07)$  %, sušina bindzilu je  $(41,74 \pm 0,05)$  %

Graf 6: Sušící křivky pro zásobní roztoky primalu a bindzilu



## 5.5 Měření povrchového napětí zásobních disperzí

Měření povrchového napětí zásobních disperzí probíhalo metodou Wilhelmyho destičky (viz. 3.2.2.3). Průběh jednotlivých měření je uveden v tabulkách v příloze P II.

### 5.5.1 Přístroje

- tenziometr Krüss K12 s příslušenstvím

- kahan Integra Fireboy

### 5.5.2 Výsledky měření

Tabulka 10: Povrchové napětí zásobních roztoků

	SFT [mN/m]	
	i bindzil	primal
1	68,00	44,51
2	67,29	44,04
3	67,12	43,69
4	68,06	43,29
<b>průměr</b>	<b>67,62</b>	<b>43,88</b>
<b>chyba</b>	<b>0,24</b>	<b>0,26</b>

#### Diskuse k výsledkům:

Výsledky odpovídají podstatě obou disperzí, vzhledem k tomu, že bindzil je disperze siliky, což je látka s vysokým měrným povrchem, tudíž i vyšší povrchovou energií. V množství, v jakém je obsažen ve vodném prostředí zásobního roztoku, povrchové napětí vody jen mírně snižuje. Primal, což je disperze málo polárních polymerů, snižuje povrchové napětí vody výrazněji.

### 5.6 Složení roztoků nanášených disperzí

Pro nanášení tenkých vrstev bylo nutné snížit koncentraci zásobních roztoků jejich zředěním. Byly zvoleny koncentrace látek, které jsou uvedeny v následující tabulce. Dále v textu budou uvedeny pouze čísla směsí.

Tabulka 11: Složení disperzí

směs č	primal	bindzil	voda
	[hm %]		
1	2,1	0,00	97,86
2	2,1	0,48	97,38
3	2,1	0,96	96,90
4	1,0	0,00	99,00
5	1,0	0,02	98,98
6	1,0	0,06	98,94
7	0,5	0,00	99,50
8	0,5	0,02	99,48
9	0,5	0,06	99,44

## 5.7 Předúprava folií před nanášením

Vzhledem k změřeným povrchovým energiím, kterými se zabývaly předchozí části, je zřejmé, že roztoky není možné bez předúpravy povrchu folií nanášet. Aby bylo dosaženo potřebné adheze roztoku k povrchu folie, bylo nutné zvýšit povrchovou energii u obou typů folií, aby bylo dosaženo dobré smáčivosti povrchu pro nanášené disperze. Toto zvýšení povrchové energie bylo zprostředkováno nízkoteplotním plazmatem v generátoru Diener femto.

### 5.7.1 Předúprava nízkoteplotním plazmatem

#### 5.7.1.1 Přístroje

- Generátor Diener Femto (40 kHz)



Obrázek 39: Diener Femto (40 kHz) [57]

#### 5.7.1.2 Parametry plazmování

- Plazmovací plyn: vzduch
- Průtok plynu: 5,5 SCCM (standardní centimetr krychlový za minutu)
- Výkon generátoru: 100 %
- Plazmovací časy: určovány pro každou směs zvlášť

Tabulka 12: Plazmovací časy folií

směs č.	Plazmovací čas [min]	
	se silikou	bez siliky
1	0,4	0,6
2	0,4	0,6
3	0,4	0,6
4	0,7	0,9
5	0,7	0,9
6	0,7	0,9
7	1,1	1,3
8	1,1	1,3
9	1,1	1,3

### 5.7.2 Povrchové energie předupravených folií

Jak už bylo zmíněno, bylo potřeba tzv. aktivovat povrch obou folií (zvýšit jejich povrchovou energii), aby byla zajištěna dobrá smáčivost povrchu a tím i dobrá adheze směsi. Vzhledem k předchozím měřením byly určeny referenční časy plazmování a pro ně změřeny hodnoty povrchových energií obou folií. Pro aditivovanou folii byl kvůli nižší povrchové energii zvolen čas 1,5 minuty, pro neaditivovanou folii byl zvolen čas 1 minuta. Následné měření povrchové energie předupravených folií probíhalo opět metodou sedící kapky a vyhodnocení pomocí teorie OWRK, aby byla zajištěna porovnatelnost výsledků. Kvůli vyšší povrchové energii byl vyměněn etylenglykol za diiodometan, protože kontaktní úhly etylenglykolu byly kvůli jeho nízkému povrchovému napětí neměřitelně malé. Kompletní záznam z měření kontaktních úhlů a grafy pro metodu OWRK jsou uvedeny v příloze P III.

Tabulka 13: Kapaliny pro OWRK a jejich povrchová napětí

kapalina	$\gamma_l^d$	$\gamma_l^p$	$\gamma_l$
	[mN/m]		
glycerol	29	34,4	<b>63,4</b>
diiodometan	37,9	20,4	<b>58,3</b>
voda	21,8	51	<b>72,8</b>



Tabulka 14: Povrchové energie BOPET folií předupravených nízkoteplotním plazmatem

Typ folie	$\gamma_s^d$	$\gamma_s^p$	$\gamma_s$
	[mN/m]		
Bez aditiva (1 min plazma)	23,69	31,27	<b>54,95</b>
S aditivem (1,5 min plazma)	24,36	32,27	<b>56,63</b>

## 5.8 Nanášení vrstev

Pro nanášení tenkých vrstev byl používán aplikátor filmu a jako podklad pod nanášenou folii byla používána skleněná deska (20x30x0,5 cm). Upravená folie byla vždy sušena v sušárně při teplotě 60 °C po dobu 10 minut.

### 5.8.1 Přístroje a pomůcky

- Film aplikátor Elcometer 3525



Obrázek 40: Aplikátor filmu Elcometer 3525 [58]

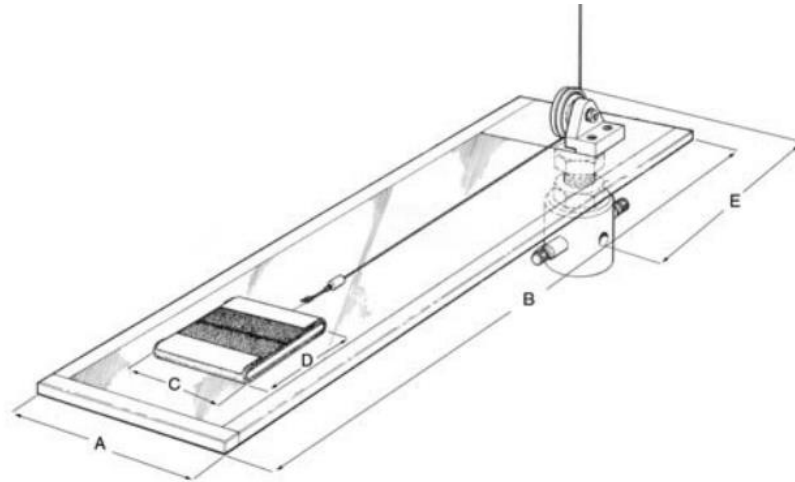
- sušárna
- skleněná deska (20\*30 cm)

## 5.9 Měření koeficientu smykového tření (vodorovná deska)

Měření probíhalo za pomoci speciálního zařízení určeného pro trhací přístroj, které zprostředkovalo převod vertikálního posuvu v horizontální pomocí kladky. Samotný posuv poté probíhal po vodorovné hliníkové desce. Hodnoty síly byly měřeny siloměrem trhacího stroje.

### 5.9.1 Přístroje a programy

- Multifunkční testovací zařízení Instron 3345
- Silový senzor 2519-103, 100N
- Rozšíření Instron pro měření COF (model 2810-005)



Obrázek 41: Rozšíření Instron pro měření COF (model 2810-005) [59]

- Software Instron Bluehill 2

### 5.9.2 Použitá norma a její změny

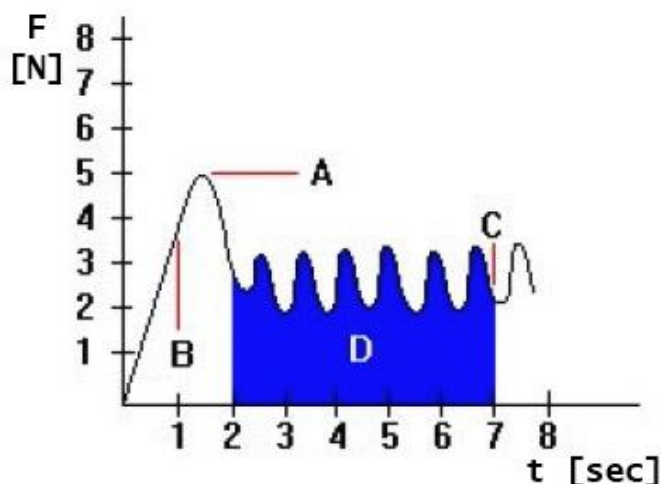
Měření probíhalo podle normy ČSN ISO 8295 s následujícími změnami:

Rychlost posuvu saní byla snížena na 25 mm/min (v normě 100 mm/min).

Tato změna byla provedena z důvodu nekonzistentních výsledků při normované rychlosti.

### 5.9.3 Vyhodnocení metody

Graf 7: Princip výpočtu COF softwarem Bluehill 2 [60]



Kde: A je maximální hodnota (z ní se počítá statický koeficient tření), B je počáteční hodnota (je možné ji vložit do softwaru pro přesnější výpočet), C je koncová hodnota (také lze vložit do softwaru), D odpovídá energii (v této části je také počítán dynamický koeficient smykového tření). [60]

### 5.9.4 Výsledky a diskuse

Měření vždy probíhalo na čtyřech sadách vzorků stejné folie a výsledky byly následně zprůměrovány. Záznam měření je uveden v příloze P IV.

Tabulka 15: Koeficienty smykového tření (vodorovná deska)

Se sílkou	DCOF [1]		Bez sílků	DCOF[1]	
	průměr	0,34		průměr	0,34
chyba	0,01	chyba	0,01		
Se sílkou	SCOF[1]		SCOF [1]		
	průměr	0,43	průměr	0,44	
	chyba	0,01	chyba	0,01	

#### Diskuse k výsledkům:

Po konzultaci těchto výsledků s dodavatelem folie bylo zjištěno, že naše hodnoty neodpovídají ani nijak nekorelují s výsledky dosahovanými metodou nakloněné roviny. Proto další měření probíhalo metodou nakloněné roviny. Pro větší přehlednost a porovnatelnost byly výsledky nemodifikovaných folií přidány k výsledkům folií povrchově upravených v části 6.

## 6 MĚŘENÍ POVRCHOVÝCH VLASTNOSTÍ MODIFIKOVANÝCH FOLIÍ

### 6.1 Měření koeficientu smykového tření (nakloněná rovina)

Měření probíhalo metodou nakloněné roviny. Záznamy pro jednotlivá měření jsou uvedeny v příloze P IV. Vzhledem k tomu, že se povrch folie ochotně nabíjel povrchovým nábojem, bylo potřeba se náboje zbavit, aby neovlivnil následné měření, proto byl povrch obou folií (vrchní i spodní) ošetřen pomocí ionizační pistole. Měření probíhalo podle normy TAPPI 815. Folie byla připevňována pomocí lepidla ve spreji tak, aby lepidlo nepřišlo do kontaktu s měřenou stranou folie. Měřena byla vždy folie opatřená nánosem v kontaktu s folií bez nánosu. Také byl brán ohled na směr orientace folie, protože výsledky v příčném a podélném směru se mohou lišit. Vždy byly folie pokládány podélným směrem (ve směru odtahu válců) rovnoběžně s osou měření.

#### 6.1.1 Přístroje a pomůcky

- Nakloněná rovina POLYMERTEST



Obrázek 42: Nakloněná rovina POLYMERTEST [61]

- Ionizační pistole SIMCO A2A4S (4 kV)



Obrázek 43: Ionizační pistole SIMCO A2A4S (4 kV) [62]

- Lepidlo ve spreji (ReMount 3M)

## 6.1.2 Výsledky měření

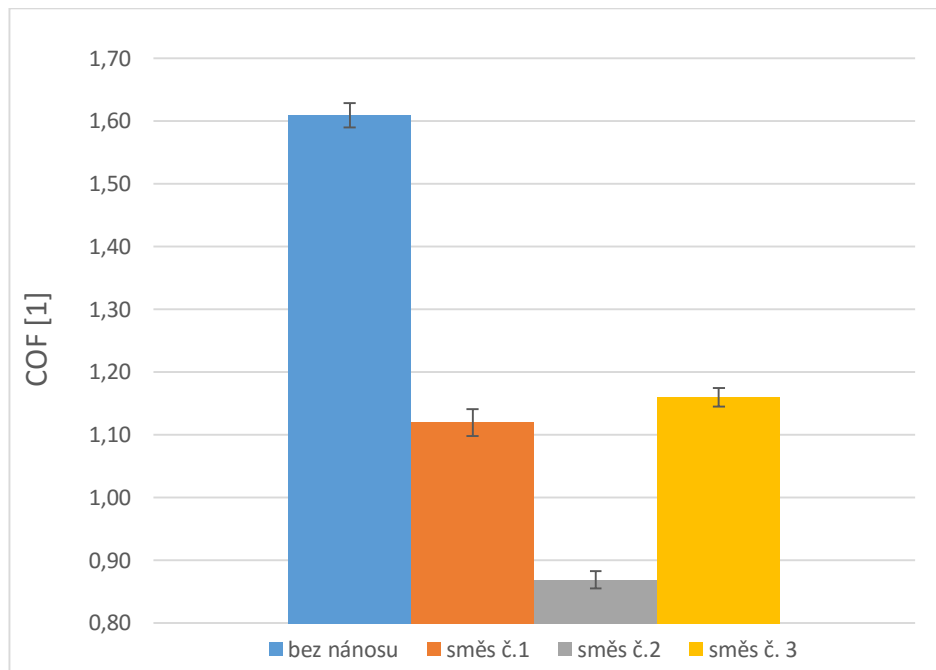
Ke každé sérii měření je přiložen výsledek pouze plazmované folie bez nánosu (01, 04, 07). V poslední části jsou pro srovnání výsledků uvedeny výsledky pro firmou dodané aditivované folie opatřené stejnými nánosy vytvořenými, ovšem jinou technologií. Tyto folie měly tloušťku 12  $\mu\text{m}$ . Záznam měření laboratorních nánosů je uveden v příloze P V. Záznam měření nánosů z Fatry je uveden v příloze P VI.

### 6.1.2.1 Folie bez siliky

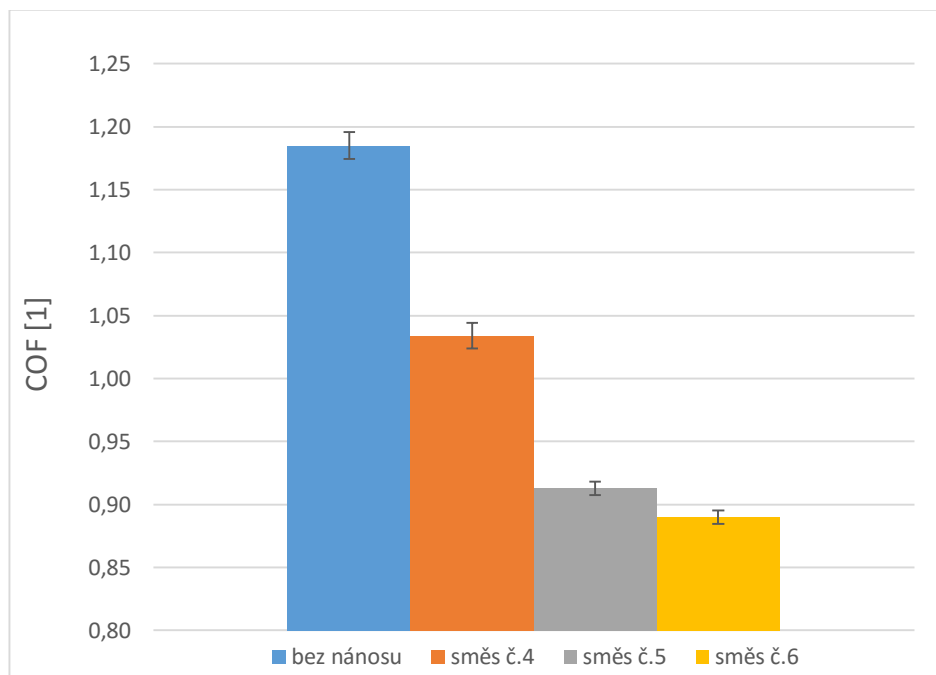
Tabulka 16: hodnoty SCOF, nakloněná rovina (laboratorní nánosy)

typ folie	bez siliky				+ silika			
nános č.	01	1	2	3	0	1	2	3
Průměr	1,26	1,01	0,89	0,92	0,92	0,92	0,90	0,88
chyba	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02
nános č.	04	4	5	6	04	4	5	6
Průměr	1,26	1,01	0,89	0,92	0,92	0,92	0,90	0,88
chyba	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02
nános č.	07	7	8	9	07	7	8	9
Průměr	1,26	1,01	0,89	0,92	0,92	0,92	0,90	0,88
chyba	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02

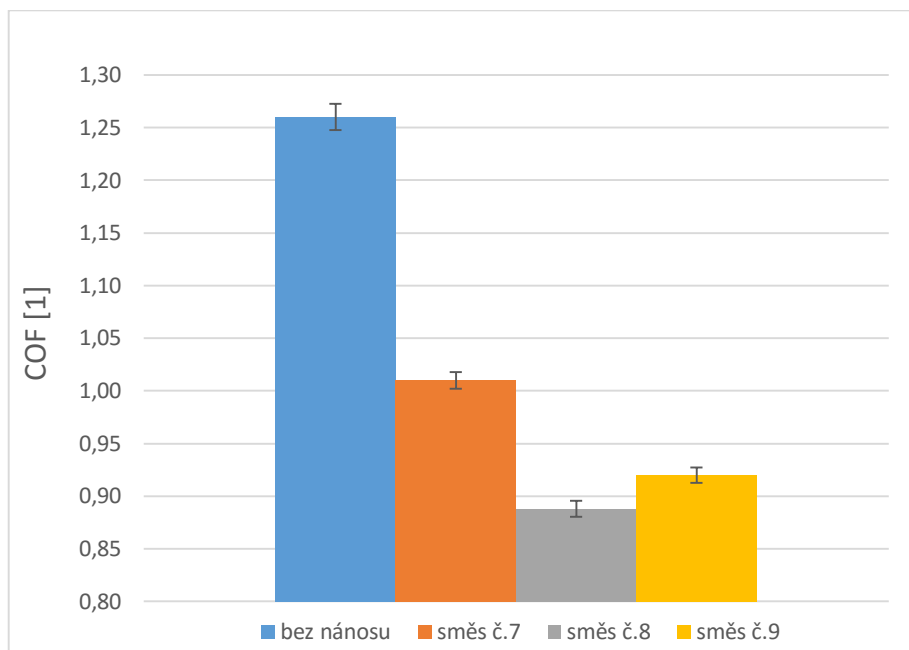
Graf 8: Porovnání SCOF pro směsi 1-3



Graf 9: Porovnání SCOF pro směsi 4-6



Graf 10: Porovnání SCOF pro směsi 7-9

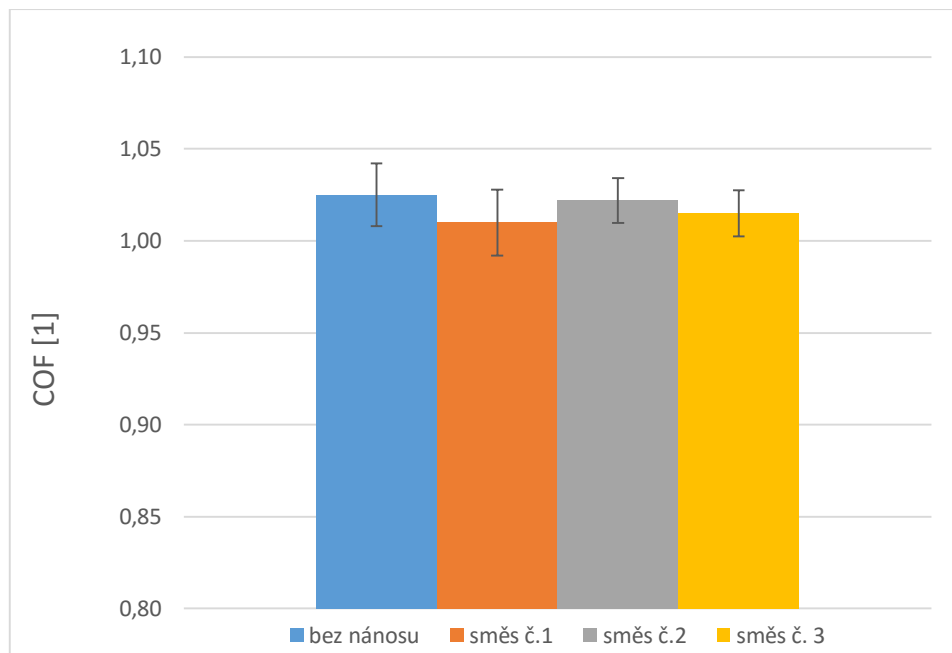
**Diskuse k výsledkům:**

Z výsledků je patrné, že nánosy mají vliv na statický koeficient tření u neaditivované folie. U všech tří sérií nánosů došlo ke snížení koeficientu a byl tím dokázán pozitivní vliv nánosů. Obsah bindzilu v nánosu pravděpodobně dále snižuje SCOF ale v měřených koncentracích které byly velmi nízké (200 a 600 ppm), není prokázán výraznější vliv bindzilu na SCOF. U vyšší koncentrace bindzilu (0,48% a 0,96%) je zřejmé, že vyšší obsah bindzilu již nemá vliv na snižování SCOF, ale spíše dochází k opačnému efektu a navíc je viditelný nežádoucí zákal folie.

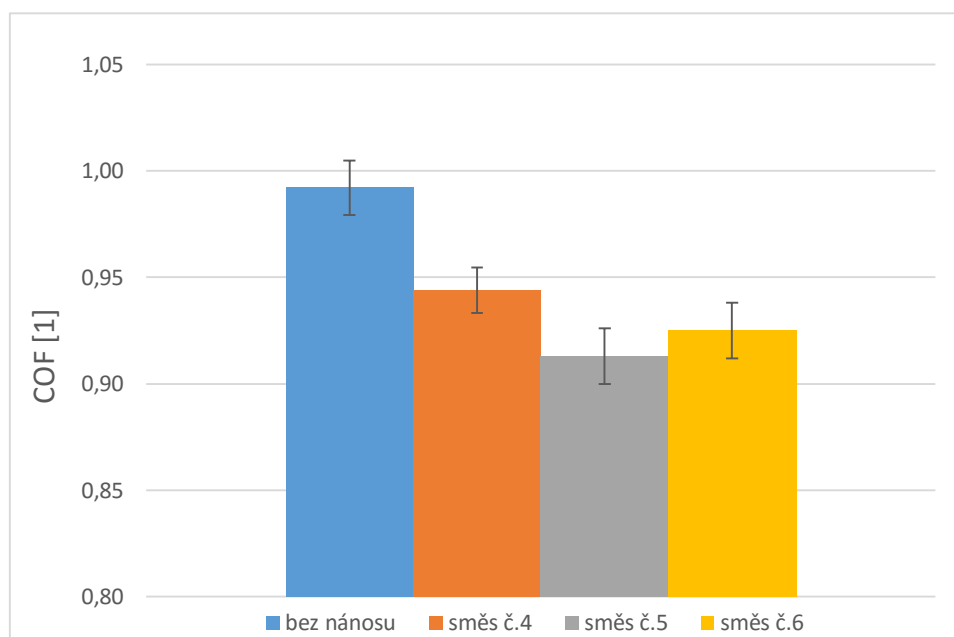
Dále lze z těchto výsledků vypožorovat, že již samotné plazmování folie má vliv na koeficient tření. Tento efekt může být přičten odstranění vrstvičky glykolu na povrchu folie, působením plazmatu. Tato vrstvička pravděpodobně způsobovala větší blokování a tím vyšší SCOF.

## 6.1.2.2 Folie s aditivem (silika)

Graf 11: Porovnání SCOF pro směsi 1-3

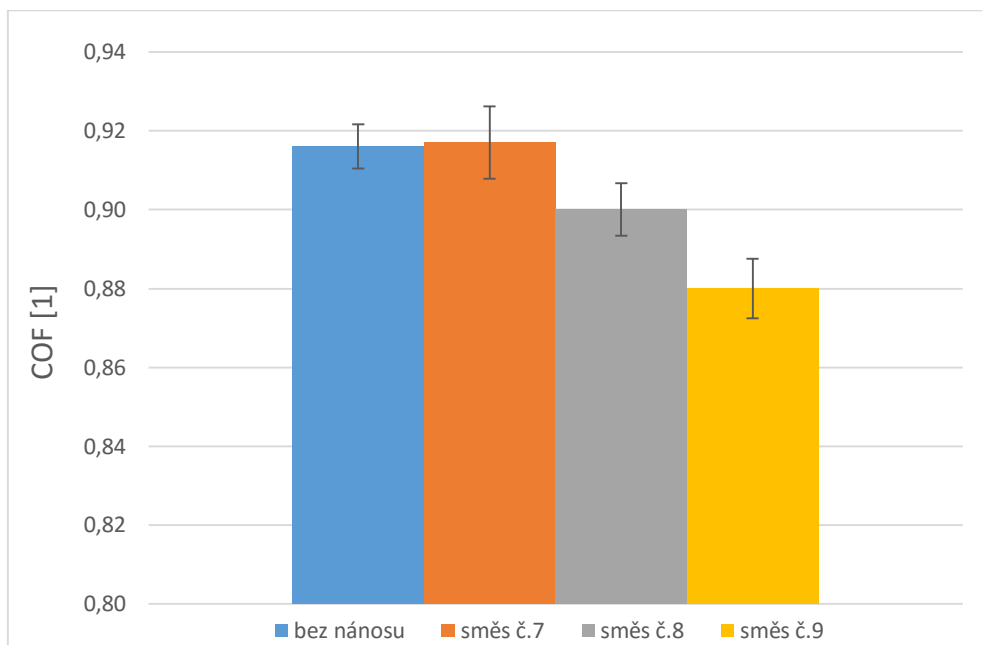


Graf 12: Porovnání SCOF pro směsi 4-6





Graf 13: Porovnání SCOF pro směsi 7-9



### Diskuse k výsledkům:

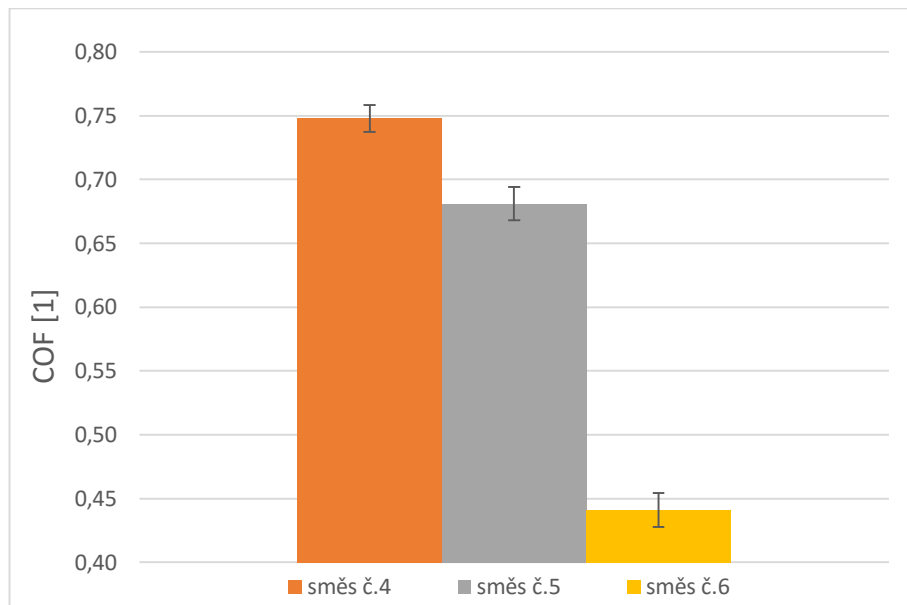
U folií obsahujících siliku se projevil minimální vliv nánosu na SCOF a také vliv plazmatu je téměř zanedbatelný. Vliv nerovností způsobených aditivem (silikou) na SCOF pravděpodobně převažuje nad vlivem nánosu. Minimální vliv plazmatu může být vysvětlen také tvrzením o vyšším obsahu glykolu u neaditované folie. Vrstva glykolu na povrchu aditované folie není, tudíž její úbytek nemůže výrazněji ovlivňovat SCOF.

#### 6.1.2.3 Výrobní nánosy, Fatra a. s. (folie se silikou, tloušťka 12 $\mu\text{m}$ )

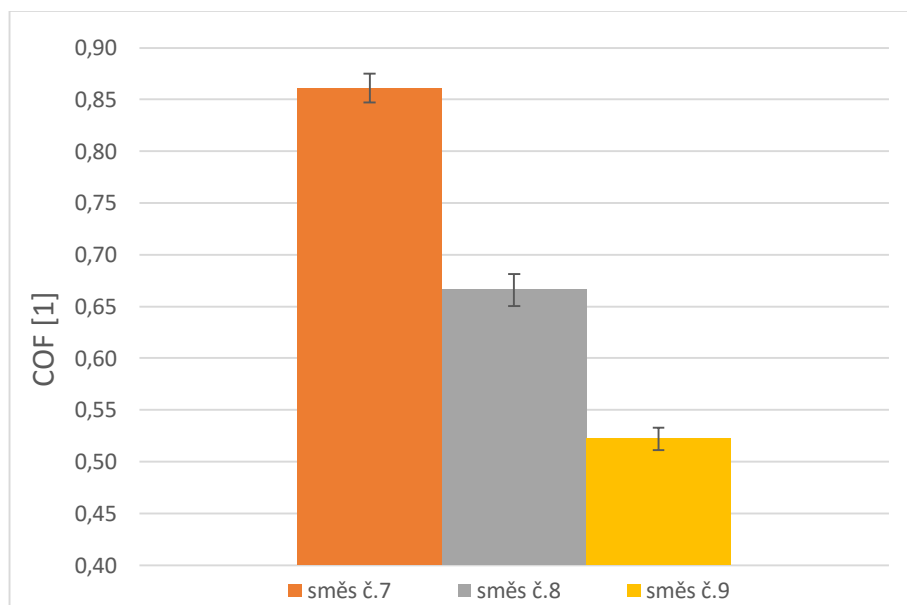
Tabulka 17: Hodnoty SCOF, nakloněná rovina (výrobní nánosy)

typ folie	+ silika (12 $\mu\text{m}$ )		
nános č.	4	5	6
Průměr	0,75	0,68	0,44
chyba	0,02	0,02	0,02
nános č.	7	8	9
Průměr	0,86	0,67	0,52
chyba	0,01	0,02	0,01

Graf 14: Porovnání SCOF pro směsi 4-6



Graf 15: Porovnání SCOF pro směsi 7-9

**Diskuse k výsledkům:**

Z těchto grafů je zřejmé, že na rozdíl od 150  $\mu\text{m}$  folií se zde projevila vliv bindzilu ve směsi. Tento efekt může být způsoben především rozdílnou technologií nánosování a samozřejmě i tloušťkou folie. Ve výrobě je pro zvyšování povrchové energie používána korona a nános aplikován pomocí gravírovaného válce na vytlačenou folii, a až poté je folie dlužena.

## 7 OBRAZOVÁ ANALÝZA VÝSLEDNÝCH NÁNOSŮ

Pro zobrazení nánosů byla nejprve zvolena optická mikroskopie, která mohla zachytit alespoň první sérii nánosů, ovšem nedostatečné rozlišení způsobilo, že mezi nánosy nebyl pozorovatelný žádný rozdíl. Proto musela být vybrána technologie s vyšším rozlišením. Touto technologií byla skenovací elektronová mikroskopie. Parametry nastavení SEM jsou uvedeny ve spodní části každého snímku.

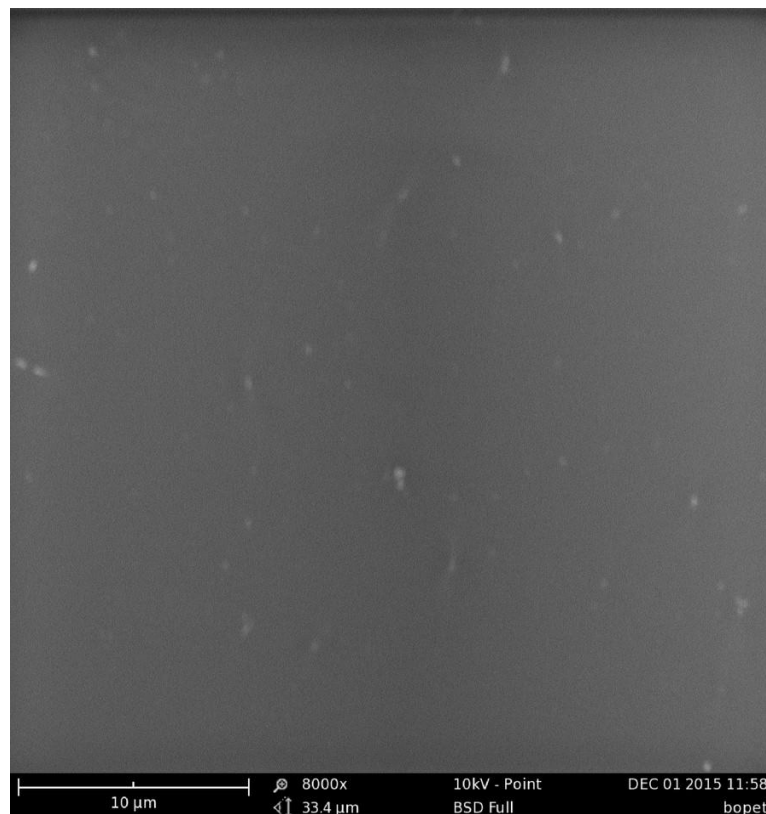
### 7.1 SEM

#### 7.1.1 Přístroje

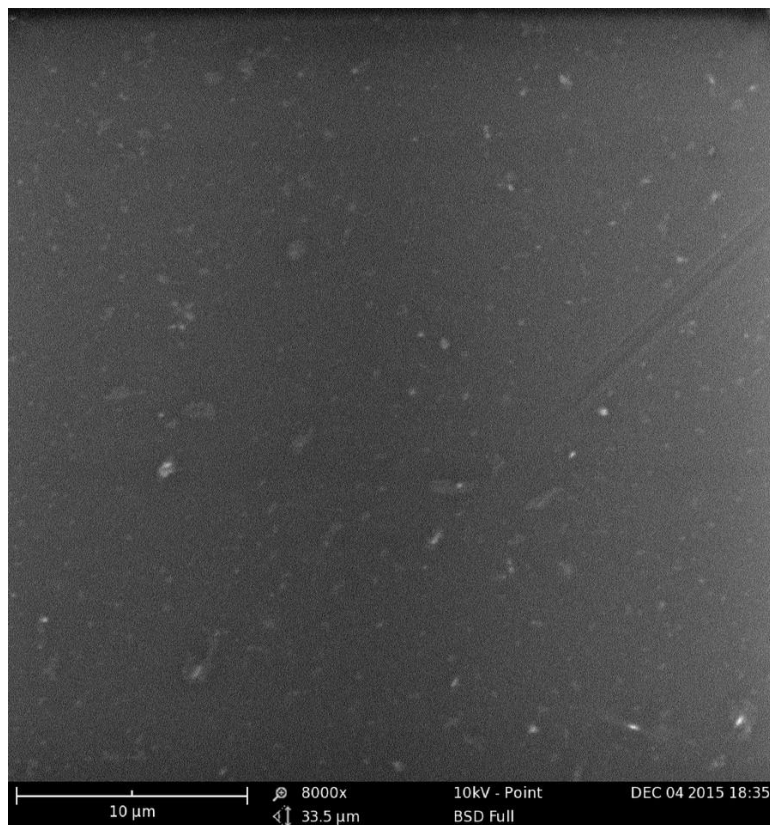
- Skenovací elektronový mikroskop PHENOMWORLD Phenom pro

#### 7.1.2 Výsledné snímky laboratorních nánosů

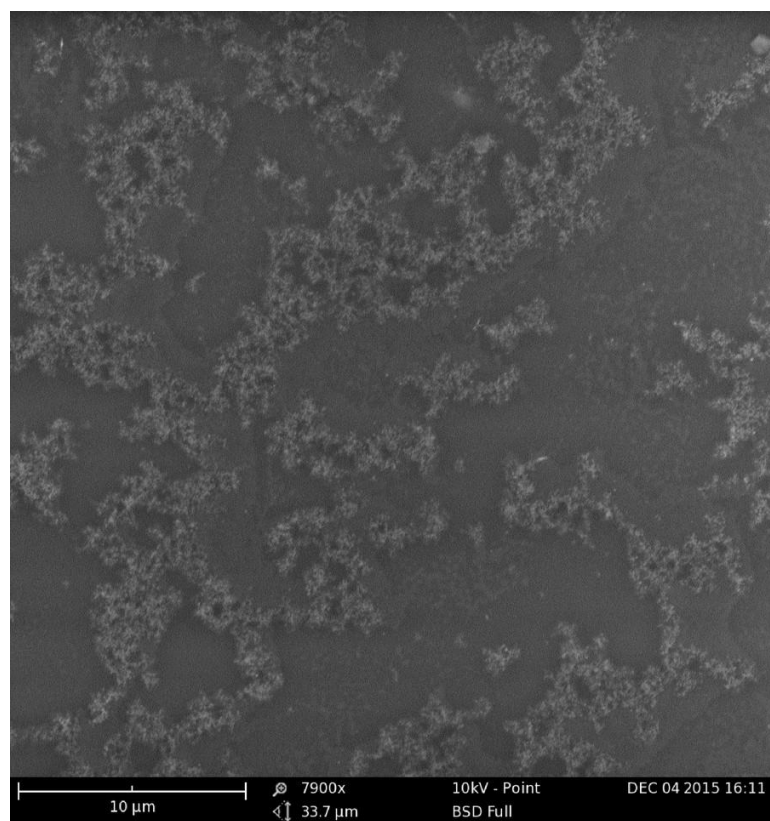
##### 7.1.2.1 Neaktivovaná folie (bez Siliky)



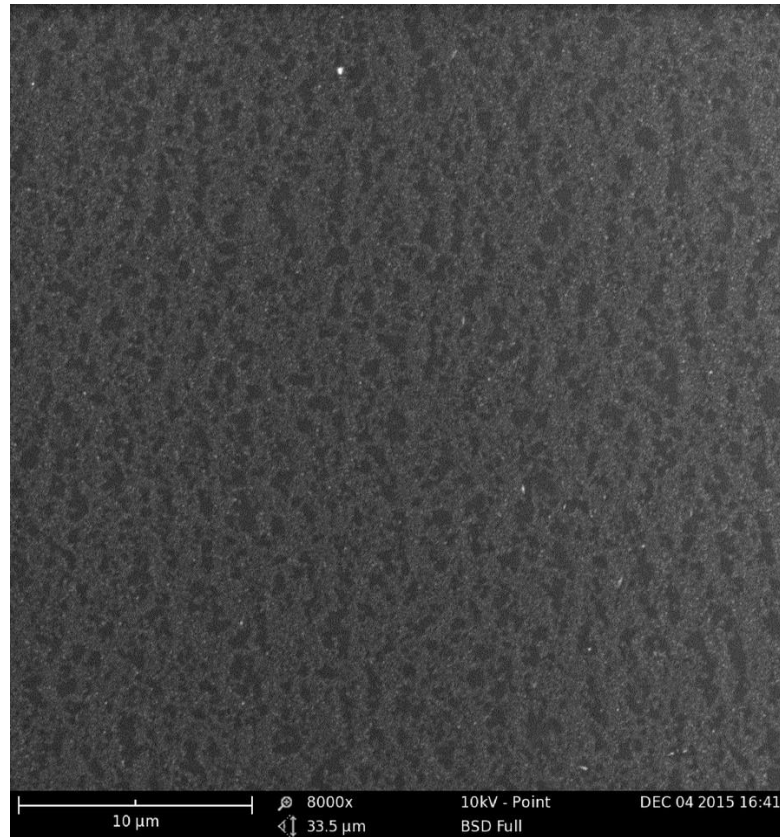
Obrázek 44: SEM snímek neaktiv. folie (bez nánosů)



Obrázek 45: SEM snímek neadit. folie (nános č. 1)



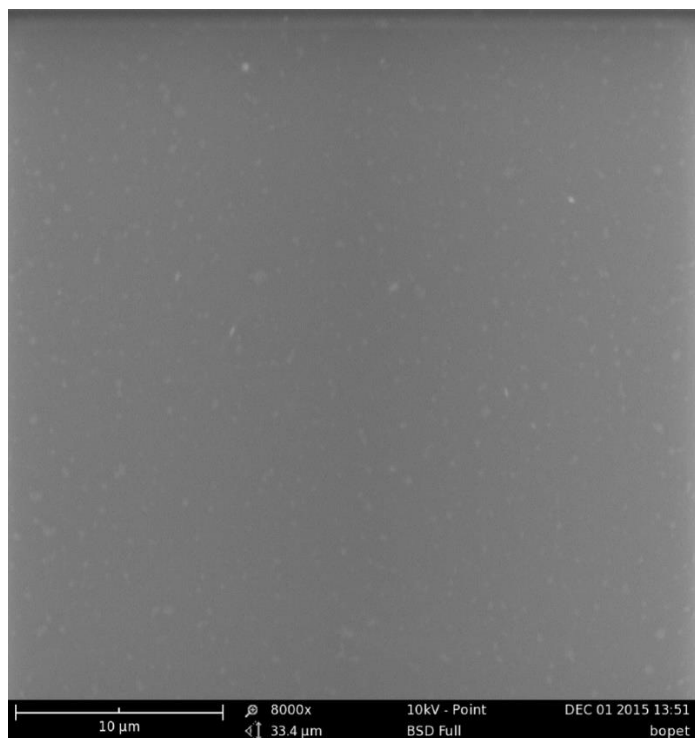
Obrázek 46: SEM snímek neadit. folie (nános č. 2)



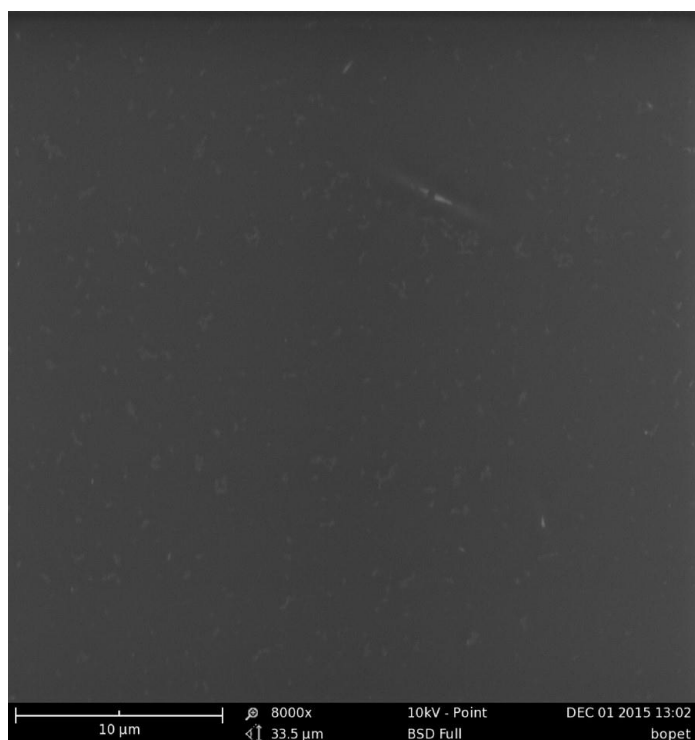
Obrázek 47: SEM snímek neadit. folie (nános č. 3)

**Diskuse k obrázkům:**

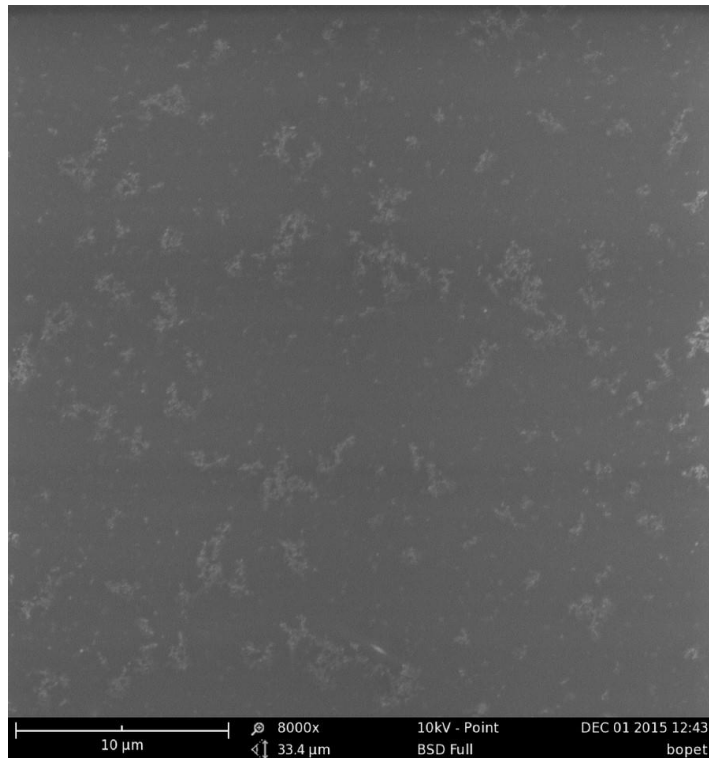
Ze snímků je patrné, že hustota nánosů na aditivované folii roste s rostoucí koncentrací bindzilu (aktivní složky), což může být příčinou snížení COF u předchozího měření. Snímky také ukazují, že nánosy nejsou rovnoměrné.



Obrázek 48: SEM snímek neadit. folie (nános č. 4)



Obrázek 49: SEM snímek neadit. folie (nános č. 5)

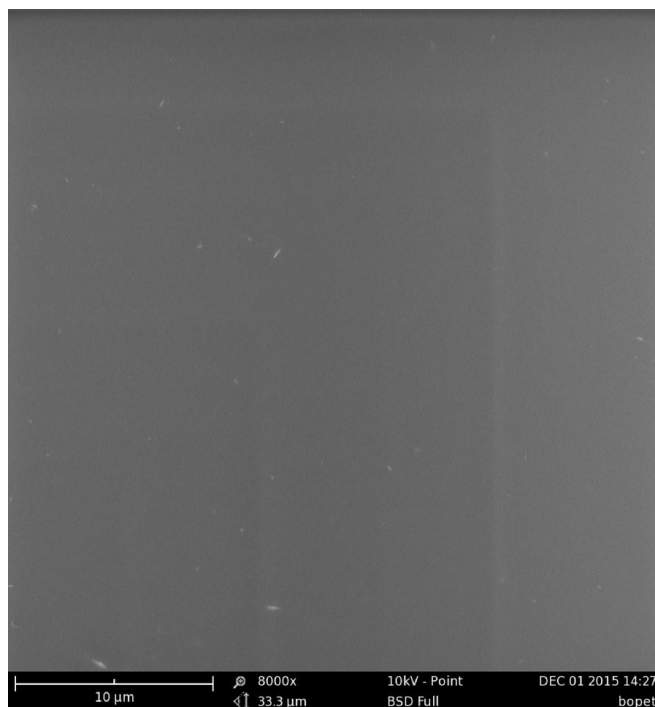


*Obrázek 50: SEM snímek neadit. folie (nános č. 6)*

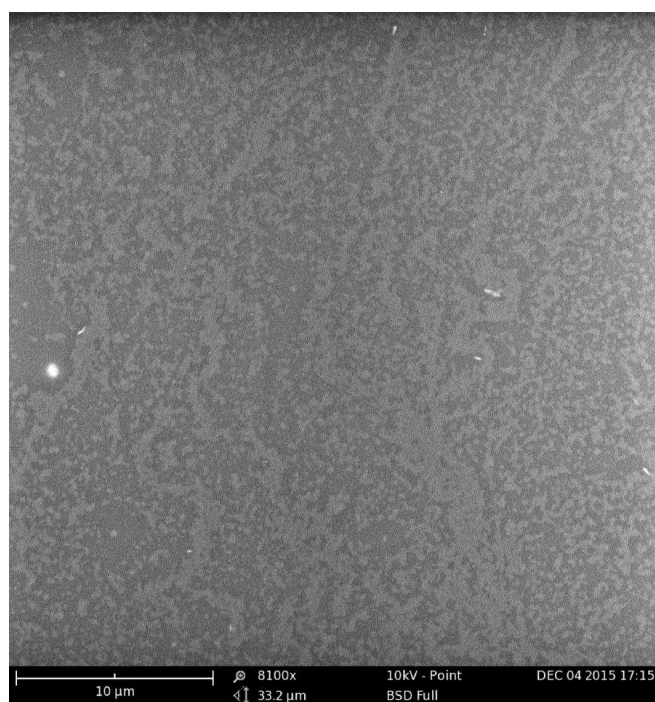
**Diskuse k obrázkům:**

U nižších koncentrací bindzilu je patrná jiná struktura nánosů. Nános nepřilne k povrchu rovnoměrně jako u předchozích směsí a také ho přilne mnohem menší množství, ale vliv na COF je podobný.

### 7.1.2.2 Folie s aditivem (silika)

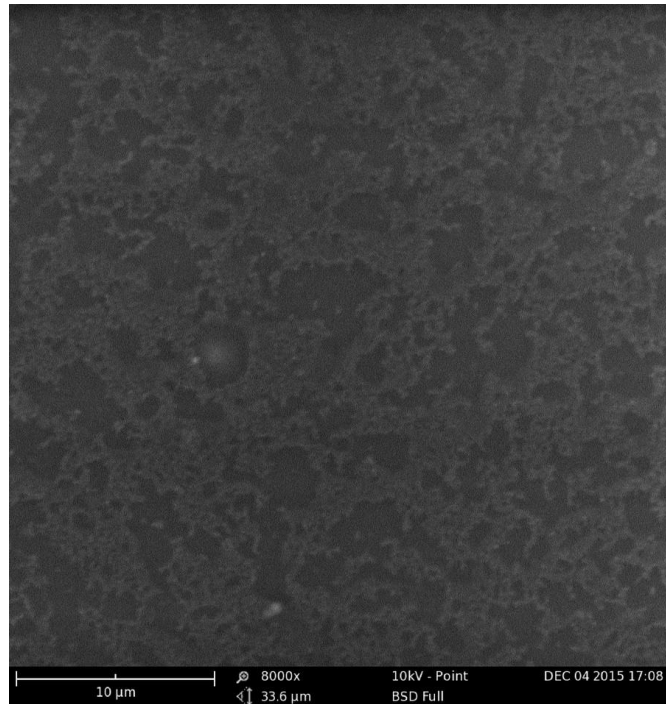


Obrázek 51: SEM snímek adit. folie (bez nánosů)

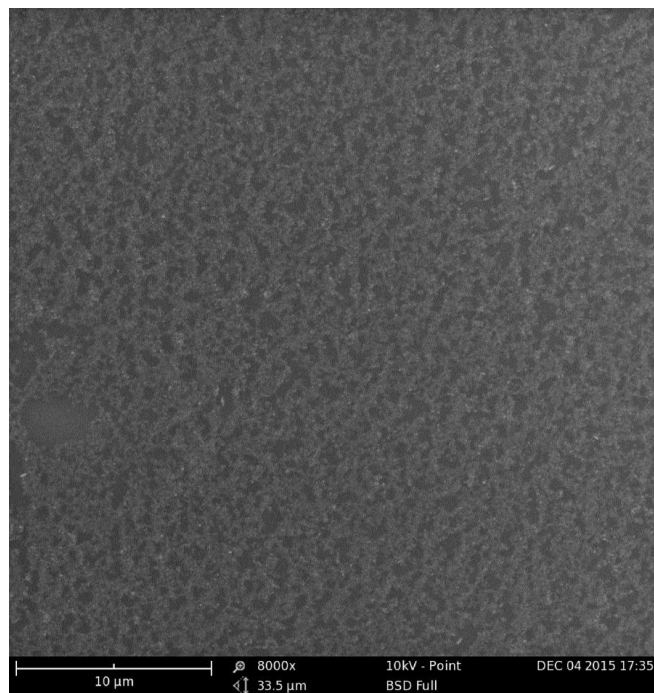


Obrázek 52: SEM snímek adit. folie (nános č. 1)





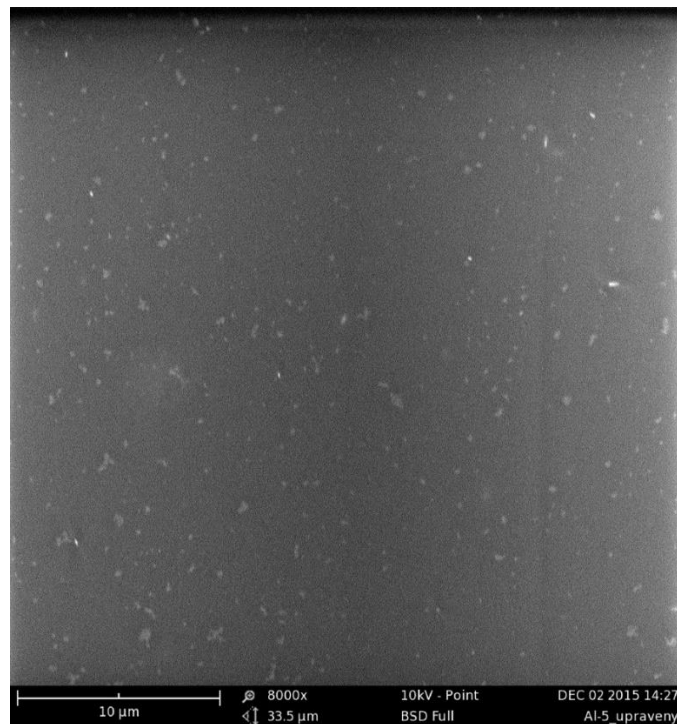
Obrázek 53: SEM snímek adit. folie (nános č. 2)



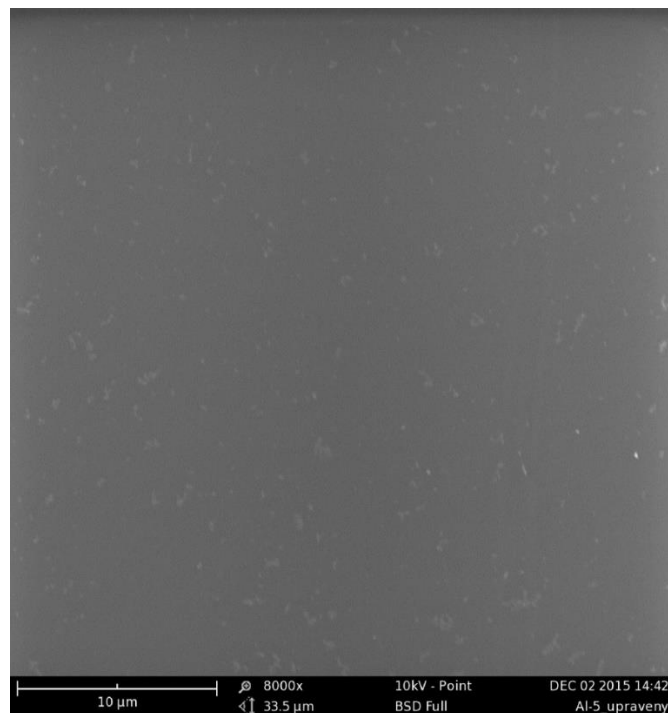
Obrázek 54: SEM snímek adit. folie (nános č. 3)

#### Diskuse k obrázkům:

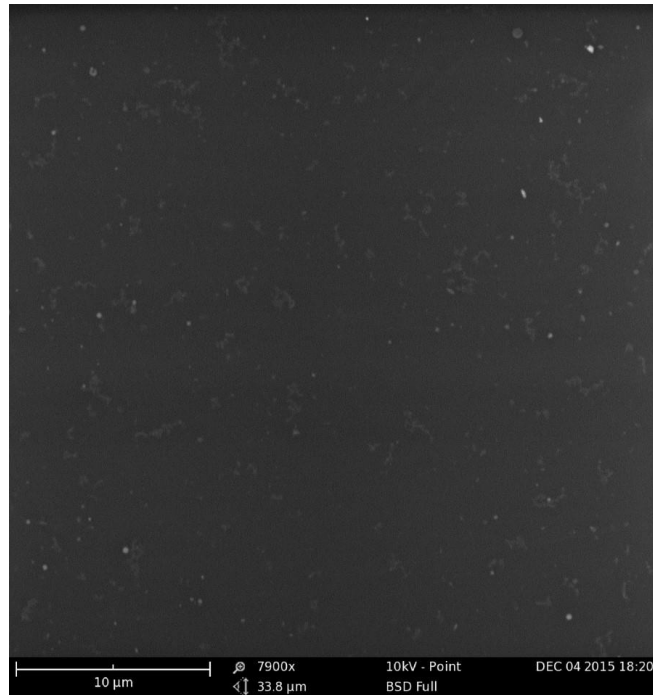
Podle těchto snímků je nános na povrchu folie se silikou nezávislý na obsahu bindzilu (koloidní siliky) ve směsi, což je způsobeno obsahem siliky v samotné folii, a tudíž je potřebná aktivní složka na povrchu zastoupena a není třeba jí dodávat do nánosovací směsi.



Obrázek 55: SEM snímek adit. folie (nános č. 4)



Obrázek 56: SEM snímek adit. folie (nános č. 5)



Obrázek 57: SEM snímek adit. folie (nános č. 6)

**Diskuse k obrázkům:**

Opět je nános nezávislý na obsahu bindzilu ve směsi kvůli obsahu aktivní složky v samotném substrátu. Hustota nánosu a jeho struktura se znova odvíjí od koncentrace akrylátu a je u všech tří směsí podobná. I zde se pravděpodobně projevuje více vliv siliky v substrátu, a proto se COF mění minimálně.

## ZÁVĚR

Cílem teoretické části této práce je popis povrchu polymerních materiálů (především polymerních folií), některých vlastností povrchu a souvislostí mezi nimi. Výrazná část teoretické rešerše je věnována také technologiím výroby a materiálům využívaným k použití pro výrobu polymerních folií. Dále se teoretická část věnuje popisu některých technik, které jsou používány pro úpravu povrchu a následně také k analýze jak upravených, tak původních povrchů.

Praktická část této práce se zabývá především analýzou povrchu dvou typů BOPET folií a aplikací ultratenkých laboratorních nánosů na povrch těchto folií. Primární snaha byla o porozumění vlivu těchto nánosů a jejich jednotlivých složek na koeficient smykového tření. Veškeré výsledky jsou diskutovány u jednotlivých částí.

Obecně lze říct, že obsah akrylátu v nánosu snižuje koeficient smykového tření folie, která neobsahuje siliku a také obsah bindzilu v nánosu COF dále snižuje, ovšem nebyl prokázán výraznější vliv bindzilu.

Folie, které obsahují ve svém objemu siliku, byly modifikovány stejnými nánosy, jako fólie neaditivované. U těchto fólií již byl vliv nánosování mnohem méně výrazný, pravděpodobně díky převažujícímu působení kluzného aditiva.

U fólií, které byly nánosovány podobnými disperzemi na průmyslovém zařízení (Fatra, a.s.) je vliv bindzilu na COF již lépe pozorovatelný. Zde se ovšem projevuje odlišná technologie nánosování (aplikace nánosů na monoaxiálně orientovanou fólii a jeho následné vysychání v průběhu následné biaxiální orientace) i mnohem menší tloušťka fólie (12  $\mu\text{m}$ ) ve srovnání s laboratorním nánosováním (100 nebo 150  $\mu\text{m}$ ). Lze tedy říct, že na průmyslové aparatuře lze pomocí nánosů na bázi akrylátu a bindzilu modifikovat COF výsledné BOPET fólie a modifikovat jeho hodnotu podle požadované aplikace.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] GHOSH, Arabinda. *Technology of Polymer Packaging*. Munich: Hanser Publications, 2015. ISBN 978-1-56990-576-0.
- [2] SWEETING, Orville J. *The science and technology of polymer films*. New York: Interscience Publishers, 1968. ISBN 0471838942.
- [3] MLEZIVA J., ŠŇUPÁREK J.: *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. Sobotáles 2000. ISBN 80-85920-72-7
- [4] Organická Chemie: Makromolekulární látky. In: *MojeChemie.cz* [online]. [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: [http://www.mojechemie.cz/Organick%C3%A1\\_Chemie:Makromolekul%C3%A1rn%C3%AD\\_1%C3%A1tky](http://www.mojechemie.cz/Organick%C3%A1_Chemie:Makromolekul%C3%A1rn%C3%AD_1%C3%A1tky)
- [5] PVC fólie. In: *Fatrafoil* [online]. [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: <http://www.folie-pvc.cz/>
- [6] Vytlačování: Vyroba folii a desek vytlačováním. *Katedra strojírenské technologie, TU Liberec* [online]. 2008 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/06.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/06.htm)
- [7] Varolplast. *Technologie zpracování plastů*[online]. [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <http://www.valorplast.com/le-campus/college/la-transformation/>
- [8] Brückner's Pilot Line. In: Brueckner [online]. [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: [http://www.brueckner.com/fileadmin/user\\_upload/downloads/Highlights\\_of\\_the\\_Pilot-Line.pdf](http://www.brueckner.com/fileadmin/user_upload/downloads/Highlights_of_the_Pilot-Line.pdf)
- [9] EBNESAJJAD, Sina. *Plastic films in food packaging: materials, technology and applications*. Waltham, MA: William Andrew, 2013. PDL handbook series. ISBN 1455731129.
- [10] KUTA A.: *Technologie a zařízení pro zpracování kaučuků a plastů*. Vydavatelství, VŠCHT Praha 1999. 203 s. ISBN 80-7080-367-3
- [11] JOHN R. WAGNER, JR. [EDITOR]., John R. Wagner, Jr. [editor]. *Multilayer flexible packaging*. 1. ed. Oxford: William Andrew, 2010. ISBN 978-081-5520-214.
- [12] Paragon Films. *Schéma výroby lité folie* [online]. [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <http://www.paragonfilms.com/mc/wp-content/uploads/2012/07/faq.jpg>

- [13] BUMBÁLEK L.: Vytváření nového povrchu a jeho význam pro funkční vlastnosti součástí vyrobených z ocelí a titanových slitin. Disertační práce, VUT Brno, 1999.
- [14] *Povrchová síla, povrchové napětí* [online]. In: [www.realisticky.cz](http://www.realisticky.cz) . s. 1-4 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://www.realisticky.cz/hodina.php?id=145>
- [15] CHAN CH. M.: *Polymer Surface Modification and Characterization*. Hanser/Gardner, Munich 1994. ISBN 3-446-15870-7.
- [16] NOVÁK J. a kol.: *Fyzikální chemie – bakalářský a magisterský kurz*. 1. vydání, VŠCHT Praha, 2008. ISBN 978-80-7080-675-3.
- [17] MALIJEVSKÝ A., NOVÁK J. P., LABÍK S., MALIJEVSKÁ I.: *Breviář z fyzikální chemie*. VŠCHT [online]. 2001, [cit. 2016-04-12]. Dostupný z: <http://old.vscht.cz/fch/cz/pomucky/BREVALL.pdf>
- [18] HAN, Jung H. *Innovations in food packaging*. Second edition. Amsterdam: Academic Press, an imprint of Elsevier, 2014. ISBN 9780123946010.
- [19] *Droplet Wetting and Evaporation*. Academic Pr, 2015. ISBN 9780128007228.
- [20] GADELMAWLA, E.S., M.M. KOURA, T.M.A. MAKSOUUD, I.M. ELEWA a H.H. SOLIMAN. Roughness parameters. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2002, 123, 133-145 [cit. 2016-04-12]. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00060-2. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013602000602>
- [21] ŠŇUPÁREK, Petr a Martin MAREK. TECHNICKÁ DOKUMENTACE: Drsnost povrchu. In: *Fakulta elektrotechniky a informatiky: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava* [online]. [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: [http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni\\_materialy/td/01-textyVSB/005\\_Drsnost%20povrchu.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/td/01-textyVSB/005_Drsnost%20povrchu.pdf)
- [22] ČSN EN 8295. *Plasty - folie a tenké desky: Stanovení koeficientu tření*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [23] STOHWASSER, Petr. Třecí síla: smykové tření. In: *Nabla* [online]. [cit. 2016-04-06]. Dostupné z: <http://www.nabla.cz/obsah/fyzika/mechanika/treci-sila-smykove-treni.php>

- [24] ABDELBARY, Ahmed. *Wear polymers and composites*. Waltham, MA: Elsevier, 2015. ISBN 1782421777.
- [25] TAPPI 815 OM-01. *Coefficient of static friction (slide angle) of packaging and packaging materials*. 3. Atlanta: Technical Association of the Pulp & Paper Industry, 2006.
- [26] Pendulum Test Overview. In: *Floorslip* [online]. [cit. 2016-04-06]. Dostupné z: <http://www.floorslip.co.uk/pendulum-test-to-check-floor-to-bs-7976-and-BS13036-4.html>
- [27] ČSN 74 4505. *Podlahy: Společná ustanovení*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [28] ASTRACHAN, Eric a Katelyn SIMPSON. Introducing the new standard for measuring coefficient of friction. In: *TCNA* [online]. Anderson, 2012 [cit. 2016-04-08]. Dostupné z: <https://www.tcnatile.com/images/pdfs/IntroducingDCOFACuTest.pdf>
- [29] Technical bulletin: Coefficient of Friction and the DCOF AcuTest. In: *TCNA* [online]. Anderson, 2013 [cit. 2016-04-08]. Dostupné z: [https://www.tcnatile.com/images/pdfs/DCOFBrochure\\_Aug2013\\_Comp.pdf](https://www.tcnatile.com/images/pdfs/DCOFBrochure_Aug2013_Comp.pdf)
- [30] *TAPPI T 816 om-92: Coefficient Of Static Friction Of Corrugated And Solid Fiberboard (horizontal Plane Method)*. Atlanta: Technical Association of the Pulp & Paper Industry, 2006.
- [31] *ASTM D1894 - 01. Static and Kinetic Coefficients of Friction of Plastic Film and Sheeting*. American National Standards Institute, 2001.
- [32] *TAPPI T 549 om-08. Coefficients of static and kinetic friction of uncoated writing and printing paper by, use of the horizontal plane method*. Atlanta: Technical Association of the Pulp & Paper Industry, 2013.
- [33] BARTOVSKÁ L., ŠIŠKOVÁ M.: *Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav*. Vydavatelství VŠCHT 2005, Praha. ISBN 80-7080-579-X.
- [34] PASHLEY R.M., KARAMAN M.E., *Principles of colloid and surface chemistry*. John Wiley and Sons, 2004, ISBN 0-470-86883-X
- [35] Test Inks: for testing the surface energy. In: *Arcotest* [online]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://www.arcotest.net/resources/arcotest+english.pdf>

- [36] VORBURGER, T. V., H.-G. RHEE, T. B. RENEGAR, J.-F. SONG a A. ZHENG. Comparison of optical and stylus methods for measurement of surface texture. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2007, [cit. 2016-04-19]. DOI: 10.1007/s00170-007-0953-8. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-007-0953-8>
- [37] ASME B46.1. *SURFACE TEXTURE: SURFACE ROUGHNESS, WAVINESS, AND LAY*. The American Society of Mechanical Engineers, 2002.
- [38] AEP TECHNOLOGY [online] [2016-04-20] Dostupné z WWW: [http://www.aep-technology.com/\\_products/profilometer.html](http://www.aep-technology.com/_products/profilometer.html)
- [39] BUCHTA, Zdeněk, Břetislav MIKEL, Josef LAZAR a Ondřej ČÍP. White-light fringe detection based on a novel light source and colour CCD camera. *Measurement Science and Technology*. 2011, vol. 22, no. 9. Dostupné z: doi: 10.1088/0957-0233/22/9/094031. ISSN 0957-0233.
- [40] AILING T., CHUNHUI W., ZHUANGDE J., HONGJUN W., BINGCAI L.: Study on key algorithm for scanning white-light interferometry. *Proceedings of SPIE*, vol. 7155, pp. 71552N--1 - 71552N--8, 2008.
- [41] KARASOVÁ, Alexandra a Andra NISTOR. *OPTICKÁ (světelná) MIKROSKOPIE* [online]. In: [fchi.vscht.cz](http://fchi.vscht.cz) [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010367/OM.pdf>
- [42] KUBÍNEK, Roman, Miroslav MAŠLÁŇ a Milan VŮJTEK. *Mikroskopie skenující sondou*. 1. vyd. V Olomouci: Vydavatelství Univerzity Palackého, 2003. Monografie (Univerzita Palackého). ISBN 80-244-0602-0.
- [43] *Mikroskopie* [online]. In: <http://www.vscht.cz/>. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: [http://old.vscht.cz/nmr/mol\\_model\\_bioinfo/lekce/mikroskopie.pdf](http://old.vscht.cz/nmr/mol_model_bioinfo/lekce/mikroskopie.pdf)
- [44] *AFM mikroskopie*. In: *VUTBR* [online]. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: [http://fyzika.fce.vutbr.cz/file/kusak/AFM\\_mikroskopie.pdf](http://fyzika.fce.vutbr.cz/file/kusak/AFM_mikroskopie.pdf)
- [45] KRAUS, V. *POVRCHY A JEJICH ÚPRAVY*. In: *Zcu.cz* [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://tzs.kmm.zcu.cz/POUcelk.pdf>
- [46] *Technologie: Technologie předúpravy*. In: *Tantec* [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.tantec.cz/technologie#plasty>



- [47] KREJČÍ V.: *Plazma, čtvrté skupenství hmoty. I. Vydání, Orbis, Praha 1974.*
- [48] LIBRA M., KLUIBER Z.: *Plazma je všude kolem nás. [on-line]. 2009, [cit. 2016-04-21]. Dostupné z www: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=22863](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=22863)*
- [49] PVD POVLAKOVÁNÍ. In: *Advamat [online]. [cit. 2016-04-21]. Dostupné z: <http://www.advamat.cz/pvd-povlakovani/>*
- [50] *Tenké vrstvy. In: Západočeská univerzita [online]. [cit. 2016-04-21]. Dostupné z: [http://www.ateam.zcu.cz/tenke\\_vrstvy\\_sma.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf)*
- [51] Magnetronové naprašování: Příprava vzorků. In: *Karlova univerzita [online]. [cit. 2016-04-21]. Dostupné z: <http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/s4r/povrch/xps/aparatura1.html>*
- [52] *Kompozice roztoku pro nanášení ultra-tenkých vrstev, zejména na povrch extrudovaných polyesterových folií. Česká republika. 29806 U1. Uděleno 21. 07. 2014. Zapsáno 20. 01. 2015.*
- [53] *FOOD CONTACT STATUS: PRIMAL AC-201 ER. Ochensand: ROHM and HESS, 2008.*
- [54] *Bindzil CC in Waterborne Coating Applications: Uses and Benefits. AkzoNobel, 2011.*
- [55] *Krüß: www stránky firmy [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.kruss.de/en/theory/measurements/contact-angle/models/owrk.html>*
- [56] *Krüß: www stránky firmy [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.kruss.de/services/education-theory/substance-data/liquids/>*
- [57] STANDARDNÍ PLAZMOVÉ SYSTÉMY. *Diener electronics [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://www.plasma.de/cz/plasmasystems/femto.html>*
- [58] *Elcometer 3525 & 3530 Adjustable Baker Film Applicators. Elcometer [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://www.elcometer.com/en/physical-test-equipment/film-application/bar-coaters-film-applicators/elcometer-3525-3530-adjustable-baker-film-applicators.html>*

- [59] *Coefficient of Friction Fixture*. INSTRON [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://www.instron.us/en-us/products/testing-accessories/grips/application-specific-accessories/friction/2810-005>
- [61] *Instron Bluehill: Calculation Reference*. INSTRON, 2006.
- [62] *Plastikářské laboratoře*. Polymertest [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://www.polymertest.cz/cz/plastikarske-laboratore.php>
- [63] Simco A2A4S mit HBB Pistole Ionizing Air Gun Ionisiergerät. *Wie-Tec* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <https://www.wie-tec.de/shop/index.php/simco-a2a4s-mit-hbb-pistole-ionizing-air-gun-ionisiergerat.html>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý
PE	Polyethylen
LDPE	Nízkohustotní polyethylen
HDPE	Nízkohustotní polyethylen
EVA	Ethylenvinylacetát
PP	Polypropylen
PA	Polyamid
EPM	Kopolymer ethylenu s propylenem
EPDM	Kopolymer ethylenu a vinylacetátu
PVC	Polyvinylchlorid
PET	Polyethylentereftalát
BOPP	Biaxiálně orientovaný polypropylen
BOPET	Biaxiálně orientovaný polyethylentereftalát
BOPS	Biaxiálně orientovaný polystyren
BOPA	Biaxiálně orientovaný polyamid
BOPVC	Biaxiálně orientovaný polyvinylchlorid
MD	Machine direction, směr odtahu válců
TD	Transversal direction, příčný směr
W	Práce [W]
$\gamma$ , SFT	Povrchové napětí [ $\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$ ]
A	Plocha [ $\text{m}^2$ ]
$\gamma_{\text{sg}}$	Povrchové napětí na rozhraní pevné a plynné fáze [ $\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$ ]
$\gamma_{\text{sl}}$	Povrchové napětí na rozhraní kapalně a plynné fáze [ $\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$ ]
$\gamma_{\text{lg}}$	Povrchové napětí na rozhraní kapalně a plynné fáze [ $\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$ ]
$\theta$	Kontaktní úhel smáčení [ $^\circ$ ]

---

$\theta_a$	Kontaktní úhel postupující [°]
$\theta_r$	Kontaktní úhel ustupující [°]
$R_a$	Střední aritmetická úchylka profilu [m]
$n$	Počet nerovností [1]
$l$	Základní délka [m]
$y$	Výška nerovností od střední čáry [m]
$S$	Střední rozteč místních výstupků profil [m]
$N$	Počet lokálních píků [1]
$t_p$	Nosný podíl profilu [m]
$L$	Měřená délka [m]
$\mu, \text{COF}$	Koeficient smykového tření [1]
$F_n$	Normálová síla [N]
$F_t$	Třecí síla [N]
$\mu_s, \text{SCOF}$	Statický koeficient smykového tření [1]
$F_s$	Síla potřebná k rozpohybování tělesa [N]
$\mu_d, \text{DCOF}$	Dynamický koeficient smykového tření [1]
POM	Polyoxymethylen
PPS	Polyphenylen sulfid
$\text{CaCO}_3$	Uhličitan vápenatý
PTV	Britská jednotka míry bezpečnosti podlah [1]
O	Obvod destičky
LCI	Interferometrie nízké koherence
WLI	Interferometrie bílým světlem
LED	Světlo emitující dioda
PVD	Fyzikální depozice vrstev

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Konstituční vzorec polyetylenu [4]</i> .....	14
<i>Obrázek 2: Konstituční vzorec polypropylenu [4]</i> .....	14
<i>Obrázek 3: Konstituční vzorec polyvinylchloridu [4]</i> .....	14
<i>Obrázek 4: Konstituční vzorec polyetylentereftalát [4]</i> .....	15
<i>Obrázek 5: Příklad vytlačovací linky [6]</i> .....	17
<i>Obrázek 6: a) Feed blok (3 vrstvy), b) Adaptér (5 vrstev) [11]</i> .....	17
<i>Obrázek 7: Schéma vyfukovací linky s horním odtahem [7]</i> .....	18
<i>Obrázek 8: Tlakové poměry ve štěrbině mezi válci [6]</i> .....	19
<i>Obrázek 9: Příklad válcovací linky, výroba folie z měkčeného PVC [6]</i> .....	19
<i>Obrázek 10: Schématické znázornění všech typů dloužení [8]</i> .....	20
<i>Obrázek 11: Přístroj pro jednostupňové biaxiální dloužení [8]</i> .....	20
<i>Obrázek 12: Schéma výroby lité folie na studený válec [12]</i> .....	22
<i>Obrázek 13: Příklad laminačního stroje [11]</i> .....	22
<i>Obrázek 14: Síly působící na molekulu v kapalině [14]</i> .....	24
<i>Obrázek 15: Kontaktní úhel smáčení [18]</i> .....	25
<i>Obrázek 16: Hystereze úhlu smáčení [19]</i> .....	26
<i>Obrázek 17: Schématické znázornění geometrie povrchu v řezu, výpočet <math>R_a</math> [20]</i> ...	27
<i>Obrázek 18: Schématické znázornění geometrie povrchu v řezu, výpočet <math>S</math> [20]</i> .....	28
<i>Obrázek 19: Schématické znázornění geometrie povrchu v řezu, výpočet <math>t_p</math> [20]</i> .....	29
<i>Obrázek 20: Fáze migrace kluzných aditiv [11]</i> .....	31
<i>Obrázek 21: Nakloněná rovina pro měření koeficientu tření [25]</i> .....	33
<i>Obrázek 22: Vodorovný zkušební stůl [22]</i> .....	34
<i>Obrázek 23: Kyvadlový testovací přístroj [26]</i> .....	35
<i>Obrázek 24: Metoda měření povrchové energie štěpením [33]</i> .....	37
<i>Obrázek 25: a) Přisedlá kapka, b) Přilínající bublina [33]</i> .....	38
<i>Obrázek 26: Metoda měření kontaktního úhlu, naklánějící se destička [33]</i> .....	38
<i>Obrázek 27: Měření kontaktního úhlu pomocí Wilhelmyho destičky [33]</i> .....	39
<i>Obrázek 28: Schéma kontaktního profilometru [37]</i> .....	40
<i>Obrázek 29: Princip měření povrchu interferometrií nízké koherence [39]</i> .....	41
<i>Obrázek 30: Princip AFM [41]</i> .....	42
<i>Obrázek 31: Tploty plazmatu (A- nízkoteplotní, B- vysokoteplotní) [47]</i> .....	45
<i>Obrázek 32: Princip napařování [49]</i> .....	46

<i>Obrázek 33: Magnetronové naprašování [51]</i> .....	47
<i>Obrázek 34: Strukturní model částice bindzilu (CC301), vzorec postranního řetězce [54]</i> .....	51
<i>Obrázek 35: Určení povrchové energie podle OWRK [55]</i> .....	52
<i>Obrázek 36: Přenosný laboratorní goniometr</i> .....	53
<i>Obrázek 37: 3D topografie povrchu folie bez siliky, optický profilometr</i> .....	56
<i>Obrázek 38: 3D topografie povrchu folie se silikou, optický profilometr</i> .....	57
<i>Obrázek 39: Diener Femto (40 kHz) [57]</i> .....	62
<i>Obrázek 40: Aplikátor filmu Elcometer 3525 [58]</i> .....	64
<i>Obrázek 41: Rozšíření Instron pro měření COF (model 2810-005) [59]</i> .....	65
<i>Obrázek 42: Nakloněná rovina POLYMERTEST [61]</i> .....	67
<i>Obrázek 43: Ionizační pistole SIMCO A2A4S (4 kV) [62]</i> .....	68
<i>Obrázek 44: SEM snímek neadit. folie (bez nánosu)</i> .....	74
<i>Obrázek 45: SEM snímek neadit. folie (nános č. 1)</i> .....	75
<i>Obrázek 46: SEM snímek neadit. folie (nános č. 2)</i> .....	75
<i>Obrázek 47: SEM snímek neadit. folie (nános č. 3)</i> .....	76
<i>Obrázek 48: SEM snímek neadit. folie (nános č. 4)</i> .....	77
<i>Obrázek 49: SEM snímek neadit. folie (nános č. 5)</i> .....	77
<i>Obrázek 50: SEM snímek neadit. folie (nános č. 6)</i> .....	78
<i>Obrázek 51: SEM snímek adit. folie (bez nánosu)</i> .....	79
<i>Obrázek 52: SEM snímek adit. folie (nános č. 1)</i> .....	79
<i>Obrázek 53: SEM snímek adit. folie (nános č. 2)</i> .....	80
<i>Obrázek 54: SEM snímek adit. folie (nános č. 3)</i> .....	80
<i>Obrázek 55: SEM snímek adit. folie (nános č. 4)</i> .....	81
<i>Obrázek 56: SEM snímek adit. folie (nános č. 5)</i> .....	81
<i>Obrázek 57: SEM snímek adit. folie (nános č. 6)</i> .....	82

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1: Porovnání základních mechanických vlastností běžných biaxiálně dloužených folií [9] .....	21
Tabulka 2: Rozdělení povrchové vrstvy [13] .....	23
Tabulka 3: Běžně používané normy pro měření COF [22, 25, 27, 30, 31, 32] .....	36
Tabulka 4: Látky obsažené v Primalu AC a jejich maximální povolený SML [53]..	50
Tabulka 5: Povrchové napětí a jeho složky pro zvolené kapaliny [56].....	52
Tabulka 6: Povrchové energie BOPET folií .....	55
Tabulka 7: 2D drsnosti, folie bez siliky.....	58
Tabulka 8: 2D drsnosti, folie se silikou.....	58
Tabulka 9: průběh sušení zásobních disperzí primalu a bindzilu .....	60
Tabulka 10: Povrchové napětí zásobních roztoků .....	61
Tabulka 11: Složení disperzí.....	61
Tabulka 12: Plazmovací časy folií .....	63
Tabulka 13: Kapaliny pro OWRK a jejich povrchová napětí.....	63
Tabulka 14: Povrchové energie BOPET folií předupravených nízkoteplotním plazmatem.....	64
Tabulka 15: Koeficienty smykového tření (vodorovná deska).....	66
Tabulka 16: hodnoty SCOF, nakloněná rovina (laboratorní nánosy) .....	68
Tabulka 17: Hodnoty SCOF, nakloněná rovina (výrobní nánosy) .....	72

**SEZNAM GRAFŮ**

Graf 1: Vliv rychlosti smýkání na koeficient smykového tření [24] .....	30
Graf 2: Metoda OWRK pro folii se silikou .....	54
Graf 3: Metoda OWRK pro folii bez siliky .....	54
Graf 4: Příklad 2D topografie povrchu folie bez siliky, mechanický profilometr .....	58
Graf 5: Příklad 2D topografie povrchu folie se silikou, mechanický profilometr .....	59
Graf 6: Sušící křivky pro zásobní roztoky primalu a bindzilu .....	60
Graf 7: Princip výpočtu COF softwarem Bluehill 2 [60] .....	66
Graf 8: Porovnání SCOF pro směsi 1-3 .....	69
Graf 9: Porovnání SCOF pro směsi 4-6 .....	69
Graf 10: Porovnání SCOF pro směsi 7-9.....	70
Graf 11: Porovnání SCOF pro směsi 1-3.....	71
Graf 12: Porovnání SCOF pro směsi 4-6.....	71
Graf 13: Porovnání SCOF pro směsi 7-9.....	72
Graf 14: Porovnání SCOF pro směsi 4-6.....	73
Graf 15: Porovnání SCOF pro směsi 7-9.....	73



## SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P I: KONTAKTNÍ ÚHLY SMÁČENÍ (FOLIE BEZ NÁNOSU)

PŘÍLOHA P II: SFT ZÁSOBNÍCH ROZTOKŮ PRIMALU A BINDZILU

PŘÍLOHA P III: KONTAKTNÍ ÚHLY SMÁČENÍ (PLAZMOVANÉ FOLIE) A GRAFY  
PRO METODU OWRK

PŘÍLOHA P IV: COF VODOROVNÁ DESKA

PŘÍLOHA P V: SCOF NAKLONĚNÁ ROVINA (LAB. NÁNOSY)

PŘÍLOHA P VI: SCOF NAKLONĚNÁ ROVINA (NÁNOSY FATRA A. S.)

**PŘÍLOHA P I: KONTAKTNÍ ÚHLY SMÁČENÍ (FOLIE BEZ NÁNOSU)**

<b>BOPET folie se silikou [°]</b>				<b>BOPET folie bez siliky[°]</b>			
<b>i</b>	<b>voda</b>	<b>eg</b>	<b>glycerol</b>	<b>i</b>	<b>voda</b>	<b>eg</b>	<b>glycerol</b>
1	69,95	46,91	61,58	1	75,19	49,50	59,44
2	70,39	44,94	60,24	2	76,55	49,46	59,36
3	71,75	46,50	60,63	3	75,85	49,63	60,39
4	70,05	47,08	60,98	4	74,11	51,18	61,11
5	71,61	49,11	59,54	5	75,41	52,06	61,28
6	71,22	47,74	61,55	6	73,44	50,46	62,34
7	72,21	47,74	59,87	7	77,33	50,95	59,44
8	70,55	46,90	61,54	8	76,65	51,72	58,87
9	70,80	48,07	60,31	9	76,70	49,98	59,16
10	70,02	48,84	61,54	10	76,57	50,61	60,87
11	70,91	49,04	60,22	11	76,89	50,96	61,70
12	71,27	49,31	61,39	12	75,13	51,51	59,22
13	70,41	49,05	61,20	13	77,78	50,48	58,57
14	70,52	49,32	61,07	14	74,76	51,09	58,16
15	73,02	50,46	60,26	15	77,77	50,52	59,24
16	72,72	48,94	60,00	16	74,75	50,12	60,21
17	70,58	47,85	61,12	17	78,38	49,57	61,73
18	69,32	50,46	60,88	18	77,37	50,46	60,22
19	70,33	47,97	60,30	19	76,78	51,13	60,26
20	71,03	48,18	61,23	20	76,40	52,06	61,35
<b>průměr</b>	<b>70,93</b>	<b>48,22</b>	<b>60,75</b>	<b>průměr</b>	<b>76,18</b>	<b>50,60</b>	<b>60,08</b>
<b>chyba</b>	<b>0,21</b>	<b>0,30</b>	<b>0,14</b>	<b>chyba</b>	<b>0,30</b>	<b>0,18</b>	<b>0,26</b>

\*eg - ethylenglykol

**PŘÍLOHA P II: SFT ZÁSObNÍCH ROZTOKŮ PRIMALU A  
BINDZILU**

primal 01		primal 02		primal 03		primal 04	
t [s]	SFT [mN/m]	t [s]	SFT [mN/m]	t [s]	SFT [mN/m]	t [s]	SFT [mN/m]
0,33	44,50	0,34	44,03	0,34	43,67	0,34	43,30
6,73	44,64	6,77	44,15	6,75	43,81	6,75	43,40
13,41	44,59	13,47	44,13	13,67	43,76	13,67	43,35
20,34	44,57	20,03	44,08	20,08	43,74	20,08	43,32
26,75	44,52	26,95	44,06	27,00	43,72	27,03	43,30
33,67	44,50	33,36	44,03	33,41	43,69	33,44	43,28
40,08	44,47	40,28	44,01	40,13	43,67	40,36	43,25
47,00	44,45	46,69	43,98	46,69	43,64	46,78	43,25
53,41	44,42	53,38	43,96	53,63	43,62	53,36	43,23
60,33	44,40	60,30	43,93	60,03	43,62	60,09	43,20
<b>průměr</b>	<b>44,51</b>	<b>průměr</b>	<b>44,04</b>	<b>průměr</b>	<b>43,69</b>	<b>průměr</b>	<b>43,29</b>
<b>chyba</b>	<b>0,02</b>	<b>chyba</b>	<b>0,02</b>	<b>chyba</b>	<b>0,02</b>	<b>chyba</b>	<b>0,02</b>

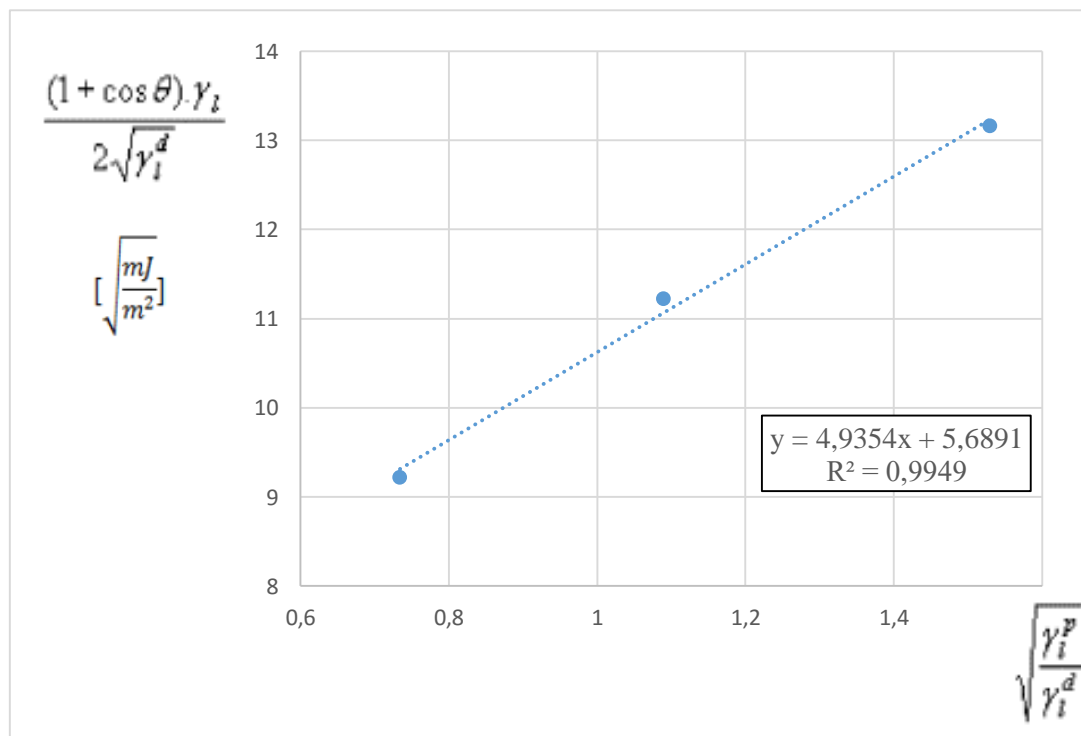
bindzil 01		bindzil 02		bindzil 03		bindzil 04	
t [s]	SFT [mN/m]	t [s]	SFT [mN/m]	t [s]	SFT [mN/m]	t [s]	SFT [mN/m]
0,34	68,04	0,34	67,45	0,34	67,21	0,33	68,16
6,89	68,13	6,75	67,40	6,89	67,21	6,74	68,13
13,45	68,09	13,47	67,35	13,45	67,18	13,44	68,11
20,03	68,06	20,06	67,33	20,03	67,16	20,00	68,09
26,97	68,01	26,99	67,28	26,77	67,13	20,47	68,09
33,38	67,99	33,39	67,26	33,69	67,11	26,70	68,06
40,30	67,96	40,31	67,23	40,08	67,09	33,63	68,06
46,73	67,94	46,72	67,21	47,00	67,09	40,03	68,01
53,66	67,91	53,45	67,18	53,42	67,06	46,95	67,99
60,08	67,87	60,16	67,16	60,34	67,01	53,36	67,94
<b>průměr</b>	<b>68,00</b>	<b>průměr</b>	<b>67,29</b>	<b>průměr</b>	<b>67,12</b>	<b>průměr</b>	<b>68,06</b>
<b>chyba</b>	<b>0,03</b>	<b>chyba</b>	<b>0,03</b>	<b>chyba</b>	<b>0,02</b>	<b>chyba</b>	<b>0,02</b>

## PŘÍLOHA P III: KONTAKTNÍ ÚHLY SMÁČENÍ (PLAZMOVANÉ FOLIE) A GRAFY PRO METODU OWRK

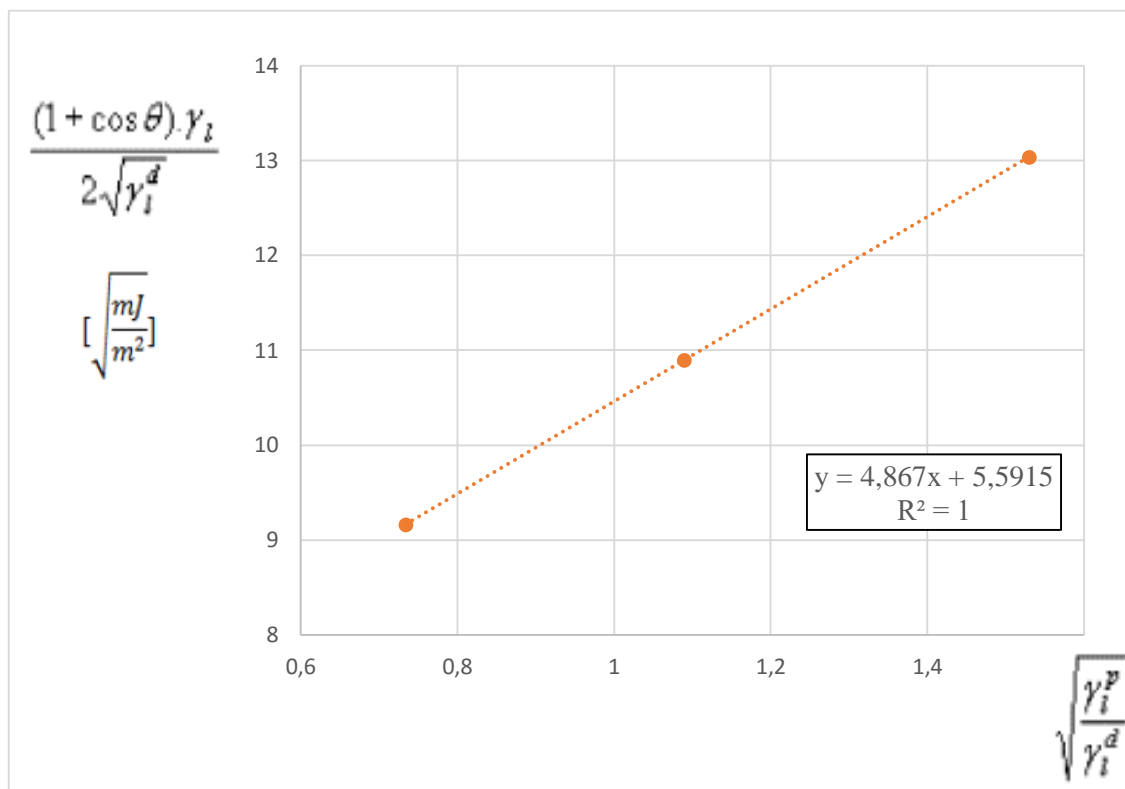
+ silika, 1,5 min plazma				bez siliky, 1 min plazma			
i	voda	djm	glycerol	i	voda	djm	glycerol
1	45,04	19,59	25,54	1	45,60	20,20	30,95
2	46,10	18,81	25,56	2	47,40	19,45	32,40
3	46,55	18,99	24,26	3	49,56	21,68	32,33
4	45,78	17,35	23,97	4	48,06	20,29	31,31
5	47,99	18,82	25,78	5	46,42	19,49	30,11
6	45,75	17,84	24,74	6	46,38	21,13	29,94
7	47,93	19,10	25,16	7	47,29	21,72	32,53
8	47,33	18,43	24,88	8	49,95	21,73	33,48
9	46,07	17,93	25,11	9	49,95	21,61	31,34
10	46,13	19,95	24,01	10	47,28	21,19	32,34
<b>průměr</b>	<b>46,48</b>	<b>18,68</b>	<b>24,90</b>	<b>průměr</b>	<b>47,79</b>	<b>20,85</b>	<b>31,67</b>
<b>chyba</b>	<b>0,31</b>	<b>0,26</b>	<b>0,21</b>	<b>chyba</b>	<b>0,49</b>	<b>0,29</b>	<b>0,36</b>

\*djm - diiodmethan

Grafické vyhodnocení metody OWRK pro plazmovanou folii se silikou (1,5 min plazma)



Grafické vyhodnocení metody OWRK pro plazmovanou folii bez siliky (1 min plazma)



## PŘÍLOHA P IV: COF VODOROVNÁ DESKA

S A D I T I V E M	STATICKÝ COF [1]					B E Z A D I T I V A	STATICKÝ COF [1]				
		a	b	c	d			a	b	c	d
	1	0,40	0,41	0,39	0,40		1	0,47	0,40	0,39	0,41
	2	0,42	0,39	0,40	0,43		2	0,45	0,49	0,42	0,40
	3	0,47	0,44	0,40	0,47		3	0,45	0,41	0,43	0,41
	4	0,42	0,44	0,40	0,50		4	0,48	0,42	0,45	0,42
	5	0,46	0,47	0,40	0,45		5	0,45	0,44	0,44	0,40
	6	0,46	0,46	0,40	0,45		6	0,44	0,40	0,42	0,48
	7	0,43	0,49	0,40	0,46		7	0,47	0,49	0,42	0,44
	8	0,37	0,45	0,40	0,46		8	0,49	0,41	0,44	0,49
9	0,40	0,47	0,39	0,48	9	0,47	0,42	0,41	0,46		
10	0,47	0,45	0,40	0,49	10	0,48	0,44	0,43	0,48		
průměr	<b>0,43</b>				průměr	<b>0,44</b>					
chyba	<b>0,01</b>				chyba	<b>0,01</b>					
DYNAMICKÝ COF [1]					DYNAMICKÝ COF [1]						
	a	b	c	d		a	b	c	d		
1	0,33	0,34	0,34	0,35	1	0,34	0,35	0,32	0,38		
2	0,34	0,33	0,35	0,36	2	0,35	0,34	0,33	0,35		
3	0,35	0,34	0,33	0,35	3	0,34	0,34	0,33	0,32		
4	0,33	0,31	0,33	0,35	4	0,34	0,35	0,33	0,33		
5	0,32	0,33	0,34	0,35	5	0,34	0,34	0,32	0,33		
6	0,33	0,32	0,34	0,34	6	0,33	0,34	0,33	0,38		
7	0,31	0,34	0,33	0,33	7	0,33	0,34	0,33	0,35		
8	0,31	0,31	0,35	0,37	8	0,34	0,33	0,33	0,32		
9	0,33	0,32	0,34	0,35	9	0,34	0,33	0,33	0,33		
10	0,36	0,31	0,35	0,37	10	0,34	0,35	0,32	0,33		
průměr	<b>0,34</b>				průměr	<b>0,34</b>					
chyba	<b>0,01</b>				chyba	<b>0,01</b>					

## PŘÍLOHA P V: SCOF NAKLONĚNÁ ROVINA, LABORATORNÍ NÁNOSY

i	SCOF [1]									
	bez nánosů		směs č.1		směs č.2		směs č.3		směs č.4	
	bez	s	bez	s	bez	s	bez	s	bez	s
1	1,6	1,00	1,20	1,10	0,90	1,00	1,15	1,05	1,00	0,96
2	1,5	1,10	1,10	1,00	0,90	1,00	1,10	1,05	1,05	0,92
3	1,6	1,05	1,15	0,95	0,80	1,05	1,20	1,05	1,05	0,90
4	1,7	1,10	1,20	1,00	0,83	1,05	1,20	1,00	1,00	0,95
5	1,6	1,00	1,05	0,95	0,82	0,99	1,10	1,00	1,05	0,90
6	1,55	1,05	1,10	1,00	0,90	1,00	1,10	0,98	1,03	0,97
7	1,6	1,00	1,00	1,05	0,86	1,05	1,20	1,05	1,01	0,92
8	1,65	0,95	1,10	1,10	0,92	0,98	1,15	0,95	1,05	0,94
9	1,6	0,95	1,20	0,95	0,84	1,10	1,20	0,97	1,10	0,99
10	1,7	1,05	1,10	1,00	0,92	1,00	1,20	1,05	1,00	0,99
<b>průměr</b>	<b>1,61</b>	<b>1,03</b>	<b>1,12</b>	<b>1,01</b>	<b>0,87</b>	<b>1,02</b>	<b>1,16</b>	<b>1,02</b>	<b>1,03</b>	<b>0,94</b>
<b>chyba</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>
i	směs č.5		směs č.6		směs č.7		směs č.8		směs č.9	
	bez	s	bez	s	bez	s	bez	s	bez	s
	1	0,90	0,85	0,90	0,91	1,00	0,95	0,88	0,87	0,90
2	0,90	0,93	0,90	0,90	1,02	0,90	0,85	0,90	0,95	0,87
3	0,92	0,93	0,89	0,95	1,05	0,88	0,92	0,89	0,92	0,88
4	0,91	0,96	0,88	0,90	0,98	0,95	0,88	0,91	0,90	0,87
5	0,90	0,88	0,90	0,94	1,00	0,90	0,90	0,87	0,95	0,90
6	0,93	0,86	0,87	0,90	1,02	0,95	0,92	0,90	0,93	0,88
7	0,90	0,94	0,87	0,95	1,00	0,95	0,88	0,92	0,90	0,90
8	0,95	0,96	0,90	0,93	1,05	0,89	0,90	0,90	0,90	0,87
9	0,92	0,88	0,89	0,97	0,98	0,90	0,90	0,94	0,90	0,92
10	0,90	0,94	0,90	0,90	1,00	0,90	0,85	0,90	0,95	0,88
<b>průměr</b>	<b>0,91</b>	<b>0,91</b>	<b>0,89</b>	<b>0,93</b>	<b>1,01</b>	<b>0,92</b>	<b>0,89</b>	<b>0,90</b>	<b>0,92</b>	<b>0,88</b>
<b>chyba</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>

\* bez – BOPET folie bez siliky

\* s – BOPET folie se silikou

## PŘÍLOHA P VI: SCOF NAKLONĚNÁ ROVINA NÁNOSY FATRA A. S.

i	SCOF [1]					
	směs č.4	směs č.5	směs č.6	směs č.7	směs č.8	směs č.9
1	0,80	0,65	0,42	0,84	0,65	0,50
2	0,70	0,60	0,42	0,84	0,63	0,53
3	0,80	0,65	0,50	0,91	0,65	0,50
4	0,70	0,60	0,45	0,90	0,75	0,50
5	0,70	0,67	0,42	0,80	0,70	0,54
6	0,80	0,70	0,50	0,92	0,60	0,55
7	0,72	0,76	0,42	0,80	0,60	0,50
8	0,70	0,80	0,40	0,90	0,70	0,50
9	0,76	0,75	0,40	0,86	0,70	0,60
10	0,80	0,63	0,48	0,84	0,68	0,50
<b>průměr</b>	<b>0,75</b>	<b>0,68</b>	<b>0,44</b>	<b>0,86</b>	<b>0,67</b>	<b>0,52</b>
<b>chyba</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>