

Univerzita Pardubice  
Fakulta chemicko-technologická  
Katedra polygrafie a fotofyziky

Změna volné povrchové energie polyetylenů v čase po úpravě korunou  
Bakalářská práce

Univerzita Pardubice  
Fakulta chemicko-technologická  
Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Veronika Holeňová**  
Osobní číslo: **C19049**  
Studijní program: **B0531A130014 Polygrafie**  
Téma práce: **Změna volné povrchové energie polyetylenů v čase po úpravě koronou**  
Téma práce anglicky: **Change in free surface energy of polyethylene over time after corona treatment**  
Zadávající katedra: **Katedra polygrafie a fotofyziky**

## Zásady pro vypracování

1. Prostudujte problematiku úpravy volné povrchové energie polymerních materiálů koronovacími zařízeními.
2. Na základě studia odborné literatury se podrobně seznamte s problematikou měření a vyhodnocení volné povrchové energie polymerních materiálů.
3. U polyetylenové fólie proměřte volnou povrchovou energii a její změnu po úpravě v koronovacím zařízení s rozdílnou expoziční dávkou a dále její změnu v čase po úpravě.
4. Dosažené výsledky analyzujte a souhrnně zpracujte ve formě závěrečné písemné práce.

Rozsah pracovní zprávy:  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Bohumil Jašúrek, Ph.D.**  
Katedra polygrafie a fotofyziky

Datum zadání bakalářské práce: **26. února 2023**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **30. června 2023**

**prof. Ing. Petr Němec, Ph.D. v.r.**  
děkan

L.S.

**doc. Ing. Tomáš Syrový, Ph.D. v.r.**  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 26. února 2023

Prohlašuji:

Práci s názvem Studium změny volné povrchové energie polymerních materiálů v čase po úpravě korunou jsem vypracovala samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byla jsem seznámena s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne

Veronika Holeňová v. r.

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu mé práce panu Ing. Bohumilu Jašůrkovi, Ph.D. za pomoc a rady, které mi dával během psaní této práce. Dále chci také poděkovat své rodině a přátelům za podporu při studiu.

Bakalářská práce vznikla za podpory projektu Modernizace praktické výuky a zkvalitnění praktických dovedností v technicky zaměřených studijních programech, reg. číslo CZ.02.2.67/0.0/0.0/16\_016/0002458 operačního programu Výzkum, vývoj a vzdělávání. Tento projekt je spolufinancován Evropskou unií.



EVROPSKÁ UNIE  
Evropské strukturální a investiční fondy  
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



## **ANOTACE**

Tato bakalářská práce se věnuje studiu změny volné povrchové energie polyethylenu v čase po úpravě korunou. V teoretické části této práce je popsáno povrchové napětí, volná povrchová energie, měření kontaktního úhlu, způsoby stanovení a vyhodnocení volné povrchové energie pevných materiálů a také typy povrchových úprav polymerních materiálů. V experimentální části této práce je prováděno vyhodnocení volné povrchové energie polyethylenu na základě naměřených hodnot kontaktních úhlů u čtyř kapalin, kontaktní úhel kapalin byl měřen metodou přisedlé kapky. Z naměřených hodnot byla určena volná povrchová energie metodou Owens, Wendt, Rabel a Kaelble (OWRK). Změna volné povrchové energie byla sledována v různých časových intervalech od korunování.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

volná povrchová energie, povrchové napětí, korona, kontaktní úhel, polyethylen

## **TITLE**

Change in surface free energy of polyethylene over time after corona treatment

## **ANNOTATION**

This bachelor's thesis is focused on the study of the change in the surface free energy of polyethylene over time after corona treatment. The theoretical part of this thesis describes surface tension, surface free energy, measurement of the contact angle, methods of determining and evaluating the surface free energy of solid materials, as well as types of surface treatments of polymer materials. In the experimental part of this work, the surface free energy of polyethylene is evaluated based on the measured values of the contact angles of four liquids. The contact angle of liquids was measured by the sessile drop method. The surface free energy was determined from the measured values using the Owens, Wendt, Rabel and Kaelble (OWRK) method. The change in surface free energy was monitored at different time intervals from coronation.

## **KEYWORDS**

surface free energy, surface tension, corona, contact angle, polyethylene

## OBSAH

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK.....	9
ÚVOD.....	10
1 TEORETICKÁ ČÁST .....	11
1.1 Volná povrchová energie pevných látek a povrchové napětí kapalin.....	11
1.1.1 Volná povrchová energie .....	11
1.1.2 Povrchové napětí.....	11
1.1.3 Kontaktní úhel.....	12
1.1.4 Metody měření volné povrchové energie .....	14
1.2 Metody úprav volné povrchové energie u polymerních materiálů .....	19
1.2.1 Koronový výboj .....	20
1.2.2 Plasma .....	21
1.2.3 Plamen .....	22
1.2.4 Fluorace .....	23
1.3 Polymerní materiály používané pro tisk .....	24
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	27
2.1 Polymerní fólie.....	27
2.2 Testovací kapaliny .....	27
2.3 Testovací fixy a inkousty .....	27
2.4 Použité přístroje a vybavení .....	28
2.4.1 Koronovací zařízení Lab Treator ASL 400 TUM .....	28
2.4.2 Přístroj OCA 50 pro měření kontaktního úhlu.....	29
2.5 Postup měření a příprava polyethylenové fólie pro měření .....	30
2.6 Výsledky a diskuse.....	33
ZÁVĚR.....	42
POUŽITÁ LITERATURA .....	43
PŘÍLOHY .....	47



## SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1: Kontaktní úhel ( $\theta$ ) a mezipovrchová napětí ( $\gamma_{ls}$ , $\gamma_{sg}$ a $\gamma_{lg}$ ) u kapky kapaliny [2] ....	12
Obrázek 2: Měření úhlu smáčení na naklánějící se destičce [6].....	13
Obrázek 3: Měření kontaktního úhlu na přisedlé kapce (a) a přilnaví bublině (b) [6] .....	14
Obrázek 4: Určení kritického povrchového napětí $\sigma_{krit}$ pomocí Zismanovy metody [17].....	18
Obrázek 5: Testovací inkousty a fixy o známém povrchovém napětí značky Arcotest [18] ...	19
Obrázek 6: Ukázka před (vlevo) a po (vpravo) úpravě volné povrchové energie povrchu materiálu [19].....	19
Obrázek 7: Schéma koronovacího zařízení [21].....	20
Obrázek 8: Tvorba funkčních skupin při úpravě koronou (vlevo) a tvorba funkčních dusíkatých skupin (podle složení dusíkové atmosféry) při úpravě plasmou (vpravo) [23].....	22
Obrázek 9: Schéma úpravy plamenem a znázornění interakcí mezi chemickými skupinami polymeru a nátěru [26].....	23
Obrázek 10: Popis procesu fluorace [27].....	24
Obrázek 11: Strukturní vzorec polyethylenu (PE).....	25
Obrázek 12: Strukturní vzorec polypropylenu (PP) .....	25
Obrázek 13: Strukturní vzorec polystyrenu (PS).....	26
Obrázek 14: Strukturní vzorec polyethylentereftalátu (PET).....	26
Obrázek 15: Koronovací zařízení Lab Treator ASL 400 TUM.....	29
Obrázek 16: Průběh měření kontaktního úhlu přístrojem OCA 50 .....	30
Obrázek 17: Snímání kapky kapaliny v programu SCA20.....	31
Obrázek 18: Ukázka grafického vyhodnocení metody OWRK pro vrchní stranu PE fólie (neupravenou koronou) pro testovaný vzorek z 6. 4. 2022 .....	32
Tabulka 1: Povrchové napětí vybraných kapalin při teplotě 20 °C [1, 5] .....	12
Tabulka 2: Povrchové napětí vybraných polymerních materiálů [1] .....	24
Tabulka 3: Ukázka tří měření volné povrchové energie u neupravené PE fólie v čase pomocí testovacích fixů a kapalin (PINK) .....	33
Tabulka 4: Průměrné hodnoty volné povrchové energie ( $\sigma_s$ ) u neupravené PE fólie pro vrchní a spodní stranu a její výběrová směrodatná odchylka (s) .....	33
Tabulka 5: Průměrné hodnoty volné povrchové energie ( $\sigma_s$ ) v čase u 1. sady koronované PE fólie pro vrchní a spodní stranu a její výběrová směrodatná odchylka (s) .....	36
Tabulka 6: Průměrné hodnoty volné povrchové energie ( $\sigma_s$ ) v čase u 2. sady koronované PE fólie pro vrchní a spodní stranu a její výběrová směrodatná odchylka (s) .....	37
Tabulka 7: Průměrné hodnoty volné povrchové energie ( $\sigma_s$ ) v čase u 3. sady koronované PE fólie pro vrchní a spodní stranu a její výběrová směrodatná odchylka (s) .....	38
Tabulka 8: Průměrné hodnoty volné povrchové energie ( $\sigma_s$ ) v čase u 4. sady koronované PE fólie pro vrchní a spodní stranu a její výběrová směrodatná odchylka (s) .....	39
Tabulka 9: Průměrné hodnoty volné povrchové energie ( $\sigma_s$ ) v čase u 5. sady koronované PE fólie pro vrchní a spodní stranu a její výběrová směrodatná odchylka (s) .....	39
Tabulka 10: Průměrné hodnoty volné povrchové energie ( $\sigma_s$ ) v čase u 6. sady koronované PE fólie pro vrchní a spodní stranu a její výběrová směrodatná odchylka (s) .....	40

## ÚVOD

Povrch látek lze charakterizovat jejich volnou povrchovou energií a povrchovým napětím. Tato energie je důležitá při určování toho, jak se kapalina chová při kontaktu s pevnou látkou, zda ji bude smáčet nebo nesmáčet a jakou adhezi bude mít. V polygrafii je důležitá znalost těchto parametrů např. u tiskových barev a potiskovaných substrátů, aby docházelo k dobrému rozprostírání a adhezi tiskových barev a laků. Volnou povrchovou energii lze určovat různými způsoby. Jednou z nejznámějších metod určování volné povrchové energie je metoda Owens, Wendt, Rabel a Kaelble (OWRK), která ve svém výpočtu využívá naměřených hodnot kontaktního úhlu zvolené kapaliny.

Významnou skupinou potiskovaných materiálů jsou polymerní materiály, jako je například polyethylen, polypropylen a polyethylentereftalát. Nevýhodou většiny polymerních materiálů je obecně jejich nízká volná povrchová energie a s tím spojená nutnost jejího zvýšení před tiskem.

Mezi metody úprav volné povrchové energie u polymerních materiálů lze zařadit hned několik metod. Nejznámější z těchto metod jsou úpravy povrchu polymerních materiálů koronovým výbojem, plamenem, plasmovým výbojem nebo také použití fluorace. Výběr vhodné metody závisí na typu zvoleného materiálu, jeho tvaru, tloušťce, velikosti úpravy a dalších parametrech.

Tato bakalářská práce se zabývá studiem změny volné povrchové energie polyethylenu upraveného koronovým výbojem. Změna volné povrchové energie je studována v různých časových intervalech od koronování a také při aplikování různých dávek korony.

# 1 TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 Volná povrchová energie pevných látek a povrchové napětí kapalin

V knize Moderní polygrafie [1] je popsáno, že každá pevná i kapalná látka má určité povrchové vlastnosti. Tyto vlastnosti mají vliv na kvalitu tisku klasickými i digitálními tiskovými technikami. Volná povrchová energie látek a povrchové napětí kapalin ovlivňují rozprostírání barvy na povrchu tiskoviny, smáčení povrchu a také adhezi barvové vrstvy k tiskovině [1, 2]. Také další kroky výrobního procesu, jako je zušlechťování a dokončování tiskovin, jsou výrazně ovlivňovány povrchovým napětím použitých materiálů [1].

### 1.1.1 Volná povrchová energie

Knihou Moderní polygrafie [1] uvádí, že pevné látky a kapaliny jsou tvořeny atomy a molekulami, mezi kterými působí celá řada mezimolekulárních sil, jinak také označovaných jako kohezní síly, které pak v těchto látkách vytvářejí energeticky výhodné soudržné vazby. U pevných látek převážně vazby chemické, u kapalin se jedná o vazby fyzikální. Uvnitř látky jsou tyto síly kompenzovány, ale na povrchu vzniká velmi tenká vrstva molekul, která působí nenulovou silou směrem dovnitř látky. Při zvětšování povrchu látky se molekuly pokoušejí dostat z vnitřní vrstvy látky na povrch, a při tom musí překonat kohezní síly, tzn., vykonávají práci a molekuly v povrchové vrstvě mají vyšší energii než molekuly ve vnitřní vrstvě. Volná povrchová energie nám vyjadřuje rozdíl energie molekul v povrchových vrstvách vůči energii, kterou by tyto molekuly měly uvnitř látky. Molekuly na povrchu látky nereagují pouze mezi sebou, ale i s okolním prostředím, na tzv. fázovém rozhraní, toto rozhraní může být například mezi pevnou látkou a kapalinou [1, 3].

Volná povrchová energie je obvykle značena řeckým písmenem  $\sigma$  a má jednotku  $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ , která vyjadřuje hustotu energie vztaženou k jednotce plochy povrchu látky [2]. Jiným způsobem by se volná povrchová energie látky dala definovat jako množství práce  $W$  vynaložené pro vytvoření povrchu o jednotkovém obsahu  $\Delta A$ .

### 1.1.2 Povrchové napětí

Zdroj [4] popisuje povrchové napětí jako efekt, kdy má povrch kapalin chování elastické fólie a má snahu dosáhnout co nejhladšího stavu, při kterém má co nejmenší energii. Čím kulatější tvar má kapka kapaliny, tím je povrchové napětí větší. Velikost povrchového napětí nám tedy u kapaliny ovlivňuje její tvar, naopak u pevné látky nám velikost povrchového napětí ovlivňuje smáčivost povrchu látky kapalinou [1]. V polygrafii se může například jednat o smáčivost povrchu tiskoviny barvou.

Povrchové napětí se obvykle označuje řeckým písmenem  $\gamma$  a udává se v jednotkách  $\text{mN}\cdot\text{m}$ . Hodnota hustoty volné povrchové energie  $\sigma$  se číselně rovná hodnotě povrchového napětí  $\gamma$  [1].

Tabulka 1 uvádí povrchová napětí čtyř kapalin, které byly vybrány pro experimentální část této práce. Povrchové napětí kapalin je nejčastěji uváděno pro teplotu  $20\text{ }^\circ\text{C}$  [1].

Tabulka 1: Povrchové napětí vybraných kapalin při teplotě 20 °C [1, 5]

Název kapaliny	Povrchové napětí [mNm <sup>-1</sup> ]
Destilovaná voda	72,8
Formamid	58,2
Dijodmethan	50,8
Ethylenglykol	47,7

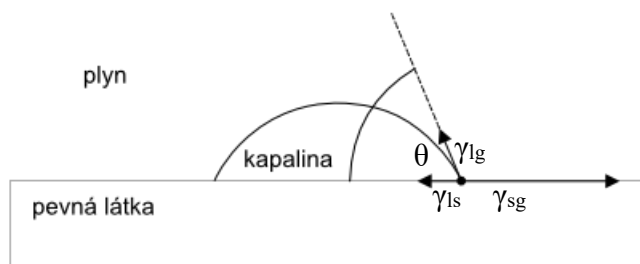
U kapalin platí závislost povrchového napětí na teplotě. Pokud teplota stoupá, klesá povrchové napětí [1]. Jako příklad lze uvést vodu, ta má při teplotě 20 °C povrchové napětí rovno 72,8 mNm<sup>-1</sup>, pokud by teplota stoupla na 50 °C, hodnota povrchového napětí by se snížila na 67,9 mNm<sup>-1</sup>. Při zvýšení teploty na 80 °C by byla hodnota povrchové napětí ještě nižší, a to 62,6 mNm<sup>-1</sup>.

V kapalinách a pevných látkách působí tzv. mezimolekulární síly, které mají polární nebo nepolární charakter, proto můžeme volnou povrchovou energii a povrchové napětí vyjádřit pomocí součtu polární a nepolární složky [1]. Polární složka povrchového napětí má pak velký vliv na adhezní vlastnosti látky [3].

### 1.1.3 Kontaktní úhel

Knihy Moderní polygrafie [1] a zdroj [2] uvádí, jak s kontaktním úhlem úzce souvisí pojem fázového rozhraní, jinými slovy také označovaného jako mezifázové rozhraní. Jedná se o oblast mezi sousedními fázemi nebo skupenskými stavy. Mezi tři základní skupenské stavy řadíme pevnou látku, kapalinu a plyn. Celkově rozlišujeme tři fázová rozhraní, a to mezi pevnou látkou a kapalinou, mezi pevnou látkou a plynem a mezi kapalinou a plynem. Mezipovrchové napětí působící v mezifázovém rozhraní se označuje jako  $\gamma_{ls}$ ,  $\gamma_{sg}$  a  $\gamma_{lg}$ , kde index  $s$  (solid) označuje pevnou látku,  $l$  (liquid) označuje kapalinu a  $g$  (gas) označuje plyn.

Ve zdroji [3] je uvedeno, že mezi měřitelné vlastnosti třífázového rozhraní mezi pevnou látkou, kapalinou a plynem řadíme kontaktní úhel (také označovaný jako krajový úhel). Jedná se o úhel, který je mezi tečnou k povrchu kapky a pevným rozhraním (Obrázek 1). Kontaktní úhel se označuje řeckým písmenem  $\theta$  a vyjadřuje smáčivost daného povrchu kapalinou [1, 3].



Obrázek 1: Kontaktní úhel ( $\theta$ ) a mezipovrchová napětí ( $\gamma_{ls}$ ,  $\gamma_{sg}$  a  $\gamma_{lg}$ ) u kapky kapaliny [2]

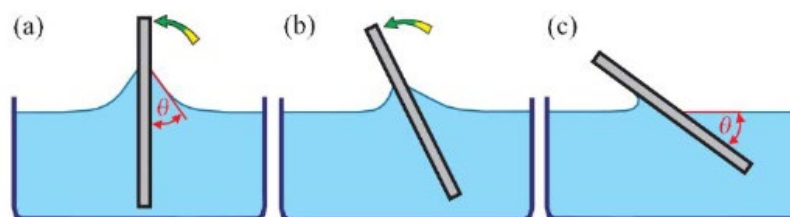
Na povrchu pevné látky se kapalina rozprostírá do té doby, dokud se součet sil, které působí na rozhraní tří fází nerovná nule [1, 2]. Tento jev popisuje Youngova rovnice (1).

$$\gamma_{sg} = \gamma_{ls} + \gamma_{lg} \cos \theta \quad (1)$$

V souvislosti s kontaktním úhlem existují dvě možnosti smáčivosti povrchu kapalinou [1, 2, 6]. Pokud je povrchové napětí kapaliny  $\gamma_{lg}$  větší než povrchové napětí pevné látky  $\gamma_{sg}$ , tak má kontaktní úhel  $\theta$  hodnotu větší než  $90^\circ$  a tím pádem kapalina povrch pevné látky nesmáčí. V případě, že je  $\gamma_{lg} < \gamma_{sg}$ , pak má kontaktní úhel hodnotu  $\theta$  mezi  $0-90^\circ$  a kapalina povrch pevné látky smáčí. Dále může nastat případ, že povrchové napětí kapaliny je mnohem menší než povrchové napětí pevné látky, kontaktní úhel je v tomto případě nulový a kapalina se v tomto stavu rozprostře na povrchu pevné látky [1].

Ve zdrojích [7, 8] jsou uvedeny metody měření kontaktního úhlu. Aby bylo možné s hodnotou kontaktního úhlu dále pracovat, musí se nejdříve změřit za pomoci vhodných metod. Kontaktní úhel lze měřit přímo na fázovém rozhraní a je možné jej stanovit za pomoci přímých i nepřímých metod. Mezi nejčastěji používané přímé metody řadíme měření kontaktního úhlu na naklánějící se destičce a měření úhlu smáčení na přisedlé kapce nebo přilnavící bublině.

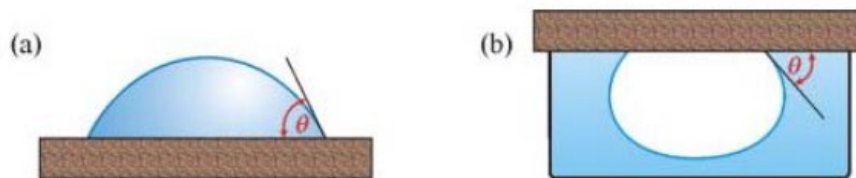
Při měření úhlu smáčení na naklánějící se destičce je využit pevný materiál, který má tvar destičky, a ten je následně ponořen do kapaliny (Obrázek 2a). Poté je destička nakláněna do té doby, než se hladina kapaliny na jedné straně destičky vyrovná od kraje nádoby po místo styku destičky s kapalinou (Obrázek 2b). Jak je patrné z (Obrázek 2c), tak v tento moment svírá destička s kapalinou úhel  $\theta$ .



Obrázek 2: Měření úhlu smáčení na naklánějící se destičce [6]

Metoda měření úhlu smáčení na přisedlé kapce nebo přilnavící bublině se nejčastěji využívá při měření rovného povrchu [7, 8]. Kontaktní úhel  $\theta$  se měří z profilu kapky a je určen za pomoci tečny, která je vedena z okraje kapky, která je v kontaktu s pevnou látkou. Pro vyhodnocení tohoto měření se využívá mikroskop nebo kamera a PC s vhodným softwarem. Kontaktní úhel je možné určit pomocí přímého odečítání nebo později z pořízené fotografie kapky. Přesnost měření za pomoci této techniky závisí na zručnosti osoby provádějící měření, na její zkušenosti a také na přesnosti provedených měření.

Na Obrázku 3a je znázorněno měření kontaktního úhlu na přisedlé kapce a na Obrázku 3b je znázorněno měření kontaktního úhlu na přilnavící bublině.



Obrázek 3: Měření kontaktního úhlu na přisedlé kapce (a) a přilnavící bublině (b) [6]

Dále také zdroje [7, 8] popisují nepřímé metody měření kontaktního úhlu. Mezi tyto metody patří například metoda kapilární elevace na svislé destičce nebo vyvažování Wilhelmyho destičky. První metoda vychází z měření výšky  $h$ , do jaké vystoupá meniskus na svislém povrchu destičky, která je ponořena do kapaliny. Druhá metoda využívá váhy, které měří sílu, jenž je potřebná k vyvážení destičky ve svislé poloze, která je vnořena do kapaliny.

#### 1.1.4 Metody měření volné povrchové energie

Ve zdroji [9] je uvedeno, že pro určení volné povrchové energie kapalin se používá celá řada přímých metod. Pevné látky lze měřit za pomoci následujících nepřímých metod:

1. Metody extrapolace měření volné povrchové energie.
2. Matematické metody, které využívají empirické vzorce k určení vztahu mezi volnou povrchovou energií a fyzikálními vlastnostmi materiálu.
3. Metody založené na měření kontaktního úhlu (volná povrchová energie materiálu je vypočítána na základě měření kontaktního úhlu u kapek různých kapalin, které se nanášejí na povrch materiálu).

Nejčastěji používané metody jsou metody založené na měření kontaktního úhlu [9]. Tyto metody umožňují provádět měření volné povrchové energie materiálů s upravenou povrchovou vrstvou.

Metoda přisedlé kapky je blíže popsána ve zdroji [2]. Tato metoda je založena na měření kontaktního úhlu a následně využívá Youngovu rovnici (1). Kapka kapaliny, u které známe povrchové napětí, je nanesena na povrch testované pevné látky. Po několika sekundách od nanesení nastává rovnováha na fázovém rozhraní mezi kapalinou, pevnou látkou a plynem. Poté následuje měření kontaktního úhlu. Z naměřené hodnoty kontaktního úhlu je vypočtena hodnota volné povrchové energie pevné látky, a to za pomoci Youngovy rovnice (1). V průběhu testování musí testovaný povrch splňovat celou řadu kritérií. Je potřeba, aby testovaný povrch byl homogenní a hladký, jinak by naměřený kontaktní úhel kapaliny nebyl jejím skutečným kontaktním úhlem. Dalším kritériem je, že s testovaným povrchem nesmí testovací kapalina chemicky reagovat. Také je potřeba, aby do sebe testovaný povrch nenasakoval testovací kapalinu tzn., aby byl nenasákavý. Další omezení platí i pro testovací kapalinu. U testovacích kapalin musíme znát jejich parametry, jako je povrchové napětí. Toto povrchové napětí musí být vždy větší než povrchová energie u testovaného povrchu.

Ve zdroji [2] je dále uvedeno, že při samotném měření dochází k celé řadě náhodných chyb, které vznikají kvůli fyzikálním dějům ovlivňujícím měření. U kontaktního úhlu testovacích

kapalin dochází k rozptylu jeho hodnot, a to je způsobeno nedokonalým usazováním kapalin na povrchu testované látky. Rozptyl hodnot naměřených kontaktních úhlů testovacích kapalin při vyhodnocování je také způsoben kvalitou obrazu. Úplně jinou kategorií chyb jsou chyby systematické, které nelze odstranit opakovaným měřením a které následně představují velké riziko špatné interpretace výsledků. Nejzávažnějšími systematickými chybami je u testovacích kapalin jejich kontaminace, u měřicího zařízení špatné světelné podmínky při měření. Dalšími typy systematických chyb mohou být nevhodná hodnota vlhkosti vzduchu nebo teploty zkoumaného materiálu. Může se také jednat o nehomogenitu povrchu, velkou drsnost a nasákavost povrchu a chemickou reaktivnost testovacích kapalin s povrchem materiálu.

Po přímém změření kontaktního úhlu kapaliny, jak uvádí zdroj [3], můžeme určit volnou povrchovou energii pevných látek, jelikož prozatím není známa žádná obecně použitelná přímá metoda, která by nám umožňovala stanovit volnou povrchovou energii. Pro stanovení volné povrchové energie pevných látek existují různé matematické modely, které při výpočtu využívají naměřené hodnoty kontaktních úhlů kapalin. Hodnotu výsledné povrchové energie ovlivňují molekulární interakce, jakou jsou např. polární, disperzní nebo acidobazické interakce. Jako první je zde popsán Fowkesův model, jelikož je tento model využíván jako základ pro další, složitější modely.

Youngova rovnice (1) neumožňuje přímo určit volnou povrchovou energii, a to kvůli dvěma neznámým proměnným:  $\gamma_{sg}$  a  $\gamma_{ls}$ . Pro výpočty byla tato rovnice zjednodušena, a to následujícím způsobem, který je hojně využíván k určování volné povrchové energie pevných materiálů (Rovnice 2) [3].

$$\gamma_s = \gamma_{ls} + \gamma_l \cos \theta \quad (2)$$

kde  $\gamma_s$  je povrchové napětí pevné látky,  $\gamma_{ls}$  je povrchové napětí mezi kapalinou a pevnou látkou,  $\gamma_l$  povrchové napětí testovací kapaliny a  $\theta$  je kontaktní úhel.

### Fowkesova metoda

Zdroj [10] uvádí, že Fowkesův model, který byl vytvořen v roce 1964, je jednou z nejpoužívanějších metod pro výpočet volné povrchové energie mezi kapalinou a pevnou látkou. Volná povrchová energie je rozdělena na polární a disperzní složku.

Fowkesova metoda je využívána k výpočtu volné povrchové energie pevné látky z naměřených hodnot kontaktních úhlů různých kapalin [11]. Podle upravené Youngovy rovnice (2) je potřeba k výpočtu volné povrchové energie z hodnoty kontaktního úhlu určit povrchové napětí mezi kapalinou a pevnou látkou označované  $\gamma_{ls}$ . Podle Fowkesovy metody, je mezipovrchové napětí  $\gamma_{ls}$  možno vypočítat na základě dvou známých povrchových napětí  $\gamma_s$  a  $\gamma_l$  a také na základě podobnosti interakcí mezi fázemi. Tyto interakce jsou interpretovány jako geometrický součet disperzní složky  $\gamma^D$  a nedisperzní složky  $\gamma^{nD}$  (Fowkes ji ve své teorii detailněji nepopisuje) povrchového napětí nebo volné povrchové energie (Rovnice 3).

$$\gamma_{ls} = \gamma_l + \gamma_s - 2 \left( \sqrt{\gamma_l^D \times \gamma_s^D} + \sqrt{\gamma_l^{nD} \times \gamma_s^{nD}} \right) \quad (3)$$

Volná povrchová energie pevné látky je zjišťována z hodnot kontaktního úhlu ve dvou krocích. Disperzní složka je vypočtena jako první s pomocí alespoň jedné čistě disperzní kapaliny. Nedisperzní složka je určena za pomoci alespoň jedné další kapaliny s polární složkou, tímto

se Fowkesova metoda začíná podobat metodě Owens, Wendt, Rabel a Kaelble (OWRK). Ta definuje nedisperzní část jako polární část a z důvodu odlišného procesu výpočtu vyžaduje pouze dvě kapaliny. Metoda OWRK se v praxi používá častěji než Fowkesova metoda [11].

### Metoda Owens, Wendt, Rabel a Kaelble

Metoda Owens, Wendt, Rabel a Kaelble je podle zdroje [12] standardní metodou pro výpočet volné povrchové energie pevných látek z hodnot kontaktního úhlu několika kapalin. Při výpočtu je volná povrchové energie rozdělena na dvě části, a to na část polární a část disperzní.

Postup výpočtu volné povrchové energie z hodnoty kontaktního úhlu vychází z Fowkesovy metody. Stejně jako u Fowkesovy metody je potřeba z upravené Youngovy rovnice (2) určit neznámou  $\gamma_{ls}$ . Na základě Fowkesovy metody, vypočítáme mezipovrchové napětí  $\gamma_{ls}$  pomocí dvou povrchových napětí  $\gamma_s$  a  $\gamma_l$  a také díky podobnosti interakcí mezi fázemi. Tyto interakce jsou interpretovány jako geometrický průměr disperzní části  $\gamma^D$  a polární části  $\gamma^P$  povrchového napětí nebo volné povrchové energie (Rovnice 4).

$$\gamma_{ls} = \gamma_l + \gamma_s - 2 \left( \sqrt{\gamma_l^D \times \gamma_s^D} + \sqrt{\gamma_l^P \times \gamma_s^P} \right) \quad (4)$$

Ve zdrojích [12, 13] je popsáno, že k určení volné povrchové energie pevné látky jsou zapotřebí alespoň dvě kapaliny se známou disperzní a polární částí povrchového napětí, přičemž alespoň jedna z kapalin musí mít polární část větší než 0.

Zdroj [12] dále popisuje, jak podle dvousložkového modelu závisí mezifázové napětí na tom, zda polární a disperzní části mohou vytvářet interakce s odpovídajícími částmi sousední fáze. Například mezipovrchové napětí, pokud vezmeme v potaz vodu jako polární kapalinu, je nižší, když je pevná látka také polární. Na druhou stranu, pokud je polární část pevné látky malá, pak člen druhé odmocniny  $(\gamma_l^P \times \gamma_s^P)^{1/2}$  nabývá nízké hodnoty. Polární interakce pak pouze nepatrně přispívají ke snížení mezifázového napětí, a to odpovídá špatnému smáčení povrchu látky a velkému kontaktnímu úhlu.

Metoda OWRK se používá při zkoumání vlivu polárních a disperzních interakcí na smáčivost a adhezi látek [12]. Pomocí metody OWRK lze zejména hodnotit a optimalizovat kontakt mezi povrchy různé polarity a vliv změny polarity, například úpravou povrchu koronovým výbojem nebo plazmovou úpravou v procesech, jako je lakování, tisk, lepení a nanášení hydrofobního nebo hydrofilního povlaku.

### Teorie Wu

Metoda Wu popsaná ve zdroji [14] je metoda, která se používá pro výpočet volné povrchové energie pevných látek z kontaktního úhlu několika kapalin. Při výpočtu se volná povrchová energie dělí na polární a disperzní část. Stejně jako u metody OWRK se při výpočtu volné povrchové energie pomocí metody Wu vychází z Fowkesovy metody a za pomoci Youngovy rovnice (2) je potřeba určit neznámou  $\gamma_{ls}$ . Mezipovrchové napětí  $\gamma_{ls}$  se vypočítá pomocí dvou povrchových napětí  $\gamma_s$  a  $\gamma_l$  a také díky podobnosti interakcí mezi fázemi. Oproti metodě OWRK, jsou tyto interakce interpretovány jako harmonický průměr disperzní části  $\gamma^D$  a polární části  $\gamma^P$  povrchového napětí nebo volné povrchové energie (Rovnice 5).



$$\gamma_{ls} = \gamma_l + \gamma_s - 4 \left( \sqrt{\gamma_l^D \times \gamma_s^D} + \sqrt{\gamma_l^P \times \gamma_s^P} \right) \quad (5)$$

Podobně jako u metody OWRK jsou zapotřebí k určení volné povrchové energie pevné látky alespoň dvě kapaliny se známou disperzní a polární částí povrchového napětí, a zároveň alespoň jedna z kapalin musí mít polární část větší než 0.

Empirický základ metody je tvořen měřením mezipovrchového napětí mezi taveninami polymerů, tedy mezi materiály s převážně nízkým povrchovým napětím jednotlivých fází [14]. V souladu s tím se metoda Wu pro výpočet volné povrchové energie většinou používá pro polymery s nízkou volnou povrchovou energií, a to až 40 mJ/m<sup>2</sup>.

### **Teorie acidobazická (van Oss a Good)**

Ossova a Goodova acidobazická metoda, popsána ve zdroji [15], je metoda pro výpočet volné povrchové energie pevné látky z kontaktního úhlu s několika kapalinami, stejně jako u předchozích dvou metod. Přitom se volná povrchová energie rozdělí na disperzní část spolu s částí Lewisovy kyseliny a částí Lewisovy báze. Při výpočtu se stejně jako u dvou předchozích metod vychází z Youngovy rovnice (2), kdy je potřeba určit mezipovrchové napětí  $\gamma_{ls}$ , které se vypočítá pomocí dvou povrchových napětí  $\gamma_s$  a  $\gamma_l$  a také díky podobnosti interakcí mezi fázemi. Oproti předchozím metodám, jsou tyto interakce interpretovány jako geometrický průměr disperzní části  $\gamma^D$  a odpovídajících kyselých částí  $\gamma^+$  a bazických částí  $\gamma^-$  povrchového napětí nebo volné povrchové energie. Na základě Lewisovy acidobazické teorie dochází k polárním interakcím, když akceptor elektronu (+) naráží na donor elektronu (-). Geometrický průměr je tedy vytvořen z příslušných protilehlých částí. Tento jev popisuje Rovnice 6.

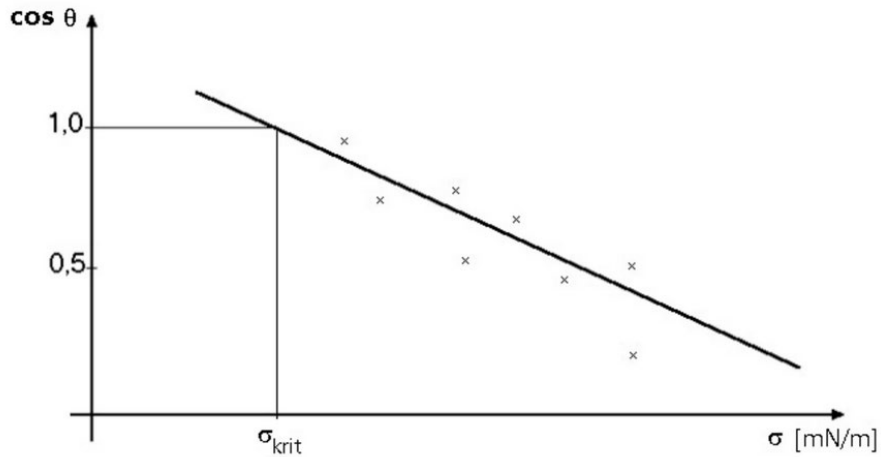
$$\gamma_{ls} = \gamma_s + \gamma_l - 2 \left( \sqrt{\gamma_s^d \times \gamma_l^d} + \sqrt{\gamma_s^+ \times \gamma_l^-} \times \sqrt{\gamma_s^- \times \gamma_l^+} \right) \quad (6)$$

Podle zdroje [15, 16] jsou k určení volné povrchové energie pevné látky v tomto případě zapotřebí alespoň tři kapaliny: jedna čistě disperzní kapalina a dvě kapaliny se známými kyselými a zásaditými částmi. Podle Lewisovy stupnice by měla být ve všech případech použita voda jako neutrální kapalina.

Ve zdroji [13] je van Oss a Good metoda popsána jako jeden z nedávných úspěchů ve studiu volné povrchové energie polymerních materiálů. Navzdory mnohým sporům a kontroverzím ohledně výsledků získaných pomocí této metody, nám tato metoda umožňuje lépe porozumět zkoumanému problému, zvláště mezifázovým interakcím mezi kyselinami a bázemi.

### **Zismanova teorie**

Metoda podle Zismana je popsána ve zdroji [17] jako metoda pro zkoumání smáčivosti pevné látky, a to stanovením kritického povrchového napětí pomocí kontaktního úhlu. V této metodě se vypočítá povrchové napětí, které musí mít kapalina, aby pevnou látku kompletně smáčela. V Zismanově teorii se kosinus kontaktního úhlu  $\theta$  vynese proti povrchovému napětí vybrané testovací kapaliny. Následně je hodnota povrchového napětí extrapolovaná na  $\cos \theta = 1$  (kontaktní úhel = 0°) a výsledek se označuje jako kritické povrchové napětí  $\sigma_{krit}$  (Obrázek 4).



Obrázek 4: Určení kritického povrchového napětí  $\sigma_{krit}$  pomocí Zismanovy metody [17]

Hodnota kritického povrchového napětí je, podle zdroje [17], často interpretována jako volná povrchová energie pevné látky. Při vycházení z této rovnosti se volná povrchová energie také určuje pomocí tzv. testovacích kapalin. Kapalína, která úplně smáčí pevnou látku, se pro testování vybírá z řady kapalin s již známým povrchovým napětím. Tato rovnost však může být zpochybněna, protože povaha interakcí mezi fázemi se vůbec nebere v úvahu. Fowkesova a OWRK metoda, která je popsána v textu výše, rozlišuje mezi polární a disperzní částí povrchového napětí. Podle této poučky je v praxi kritické povrchové napětí  $\sigma_{krit}$  stejné jako volná povrchová energie pouze pro tzv. nepolární systémy.

### Testovací fixy a kapaliny

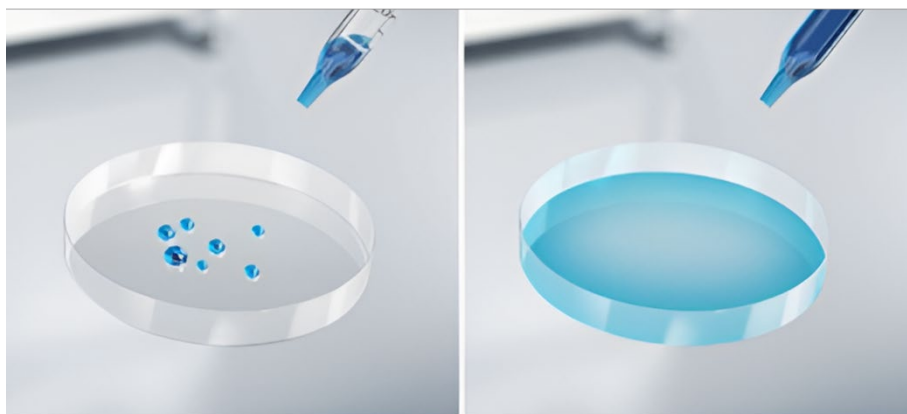
Na webových stránkách společnosti Proinex Instruments, s. r. o. [18] je popsáno, jakým způsobem lze měřit povrchové napětí s využitím testovacích fixů a inkoustů. Nejčastěji se v praxi pro určování volné povrchové energie pevných látek používají testovací fixy a inkousty, u kterých je známo jejich povrchové napětí. Přesnost této metody měření je  $\pm 1 \text{ mNm}^{-1}$ . Jedná se o velmi jednoduchou a rychlou metodu. Základní princip měření pomocí této metody spočívá v nakreslení čáry na materiál, který chceme otestovat. Následně se povrchové napětí vyhodnotí na základě toho, zda se nakreslená čára „rozpadá“ nebo zůstává nezměněna. Pokud se nakreslená čára rozpadá, znamená to, že povrchové napětí daného materiálu je nižší než povrchové napětí nanesené kapaliny. V případě, kdy k rozpadu nakreslené čáry nedojde, je povrchové napětí materiálu vyšší, než je hodnota povrchového napětí kapaliny. K testování se využívá sada testovacích inkoustů (Obrázek 5), které mají odstupňované hodnoty povrchového napětí.



Obrázek 5: Testovací inkousty a fixy o známém povrchovém napětí značky Arcotest [18]

## 1.2 Metody úprav volné povrchové energie u polymerních materiálů

Jak již bylo v této práci zmíněno, pokud není volná povrchová energie pevného materiálu dostatečně vysoká, může se stát, že materiál nebude mít správné adhezní vlastnosti, tj. nebude umožňovat dobré smáčení a přilnavost tiskové barvy. Z tohoto důvodu je nutné volnou povrchovou energii materiálu zvýšit vhodnými metodami. Na Obrázku 6 můžeme pozorovat rozdílné chování kapaliny na povrchu pevného materiálu před a po jeho úpravě.



Obrázek 6: Ukázka před (vlevo) a po (vpravo) úpravě volné povrchové energie povrchu materiálu [19]

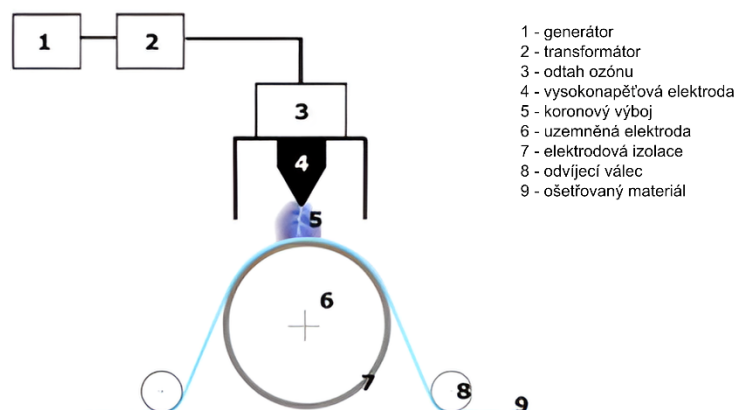
Úpravu povrchu materiálu, za účelem zvýšení jeho volné povrchové energie, popisuje zdroj [19]. Potřeba úpravy povrchu polymerního materiálu může například souviset s potřebou přilepit plastové materiály na kovy nebo jiné plastové materiály, nebo se také může jednat o potřebu tisku na povrch plastu. Aby toho bylo úspěšně dosaženo, tekuté lepidlo nebo barva by měly být schopny smáčet povrch daného materiálu. Z tohoto důvodu jsou potřebné technologie úpravy povrchu, jako je např. koronový výboj, plasma nebo plamen. Kromě těchto metod existuje ještě celá řada dalších, které lze pro úpravu povrchu polymerního materiálu použít (například fluorace).

Čím vyšší je volná povrchová energie pevné látky ve vztahu k povrchovému napětí kapaliny, tím lepší je jeho smáčivost a tím je kontaktní úhel menší [19]. Aby kapalina dobře smáčela povrch pevné látky, měla by volná povrchová energie pevné látky převyšovat povrchové napětí kapaliny asi o 2 až 10 mN/m v závislosti na použitém materiálu.

### 1.2.1 Koronový výboj

Koronový výboj vzniká ionizací neutrálního plynu, jako je vzduch, který odděluje dvě elektrody s vysokým napětím. Následně je vytvořena plazma, vysoce reaktivní plyn, který obsahuje radikály, ionty a ozon a elektrický náboj se přenáší přechodem z iontů na molekuly neutrálních plynů [20].

Zdroj [21] popisuje, že zařízení používaná při úpravě koronou se nazývají aktivátory. Ty se skládají z generátoru, transformátoru a sady elektrod (vysokonapěťové elektrody a uzemněné elektrody) viz Obrázek 7. Uzemněná elektroda je pokryta např. polyestery nebo vulkanizovanou silikonovou pryží.



Obrázek 7: Schéma koronovacího zařízení [21]

Koronovací zařízení je podle zdroje [21] založeno na vysokofrekvenčních výbojích. Tyto výboje jsou výsledkem rozdílu potenciálů v elektrodovém prostoru, který je naplněn plynem, např. vzduchem. Výboje mezi elektrodami mají za následek ionizaci atmosféry, kterou jsou obklopeny. Kvůli vytvořenému plasmatu (ionizovanému vzduchu) je emitováno modrofialové světlo. Upravovaný materiál se nachází v mezeře mezi elektrodami a jeho povrch je modifikován ionizovaným vzduchem. Kinetická energie elektronů, které vznikají při výboji v elektrodovém prostoru, má hodnotu od několika jednotek do několika desítek elektronvoltů. Průměrná hodnota kinetické energie elektromagnetického pole při koronování je 10 eV. Elektrony s energií vyšší, než je vazebná energie, narážejí do materiálu, rozbíjejí jeho molekulární vazby a způsobují jeho modifikaci. Během koronového výboje vzniká ozón, atomy kyslíku a volné radikály. Tyto oxidanty v kombinaci s volnými radikály, které se nacházejí na povrchu materiálu, vytvářejí hydroxylové, karboxylové, karbonylové a esterové skupiny.

Plasma v aktivátoru je generována rychlou změnou elektromagnetického pole, které má obvykle frekvenci 10–40 kHz [21]. Toto pole způsobuje vibrace atomů a částic plynu mezi elektrodami, a ty vedou k ionizaci, disociaci a excitaci povrchu. Kinetická energie částic, atomů a iontů plynů v plasmatu, vznikajících při koronových výbojích, je v poměru ke kinetické energii elektronů velmi nízká, to je také důvod, proč nejsou tyto částice příliš významné pro změny ve vrchní vrstvě materiálu. Kinetická energie elektronů v plasmatu je obvykle vyšší než

energie chemických vazeb v polymerních řetězcích a srážka elektronů s polymerním řetězcem pak vede k jeho přerušení. Rozbití vazeb má za následek vznik radikálů, které spouštějí chemické reakce: především oxidační procesy a změnu vlastností vrchní vrstvy polymeru.

Pouze ta strana materiálu, která je blíže k elektrodě s vysokým potenciálem, je ošetřena korunou a vykazuje změnu volné povrchové energie [22]. Průběh a účinnost úpravy korunou, souvisí s výstupním výkonem generátoru, vzdáleností mezi elektrodami (velikost mezery mezi nimi) a dobou interakce [21]. Tyto faktory určují množství energie přenášené ionizovanými částicemi.

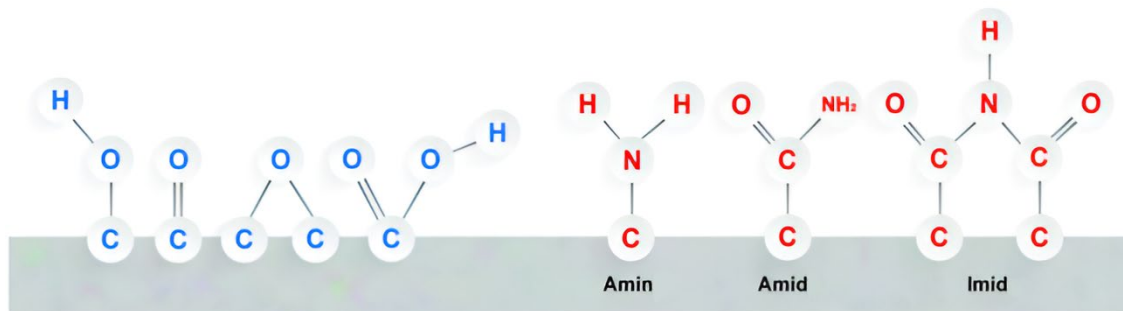
Ve zdroji [21] je popsáno, jak v důsledku úpravy materiálu korunou dochází pomocí fyzikálních a chemických úprav ke změně chemických vlastností jeho povrchu. Elektrony mění molekuly  $O_2$  a  $H_2O$  na ionty  $O^-$  a  $OH^-$ . Ozón, který vzniká při výbojích, způsobuje poškození (praskliny) na povrchu materiálu. Produkce ozónu závisí na velikosti koronového výboje, relativní vlhkosti prostředí a také obsahu (složení) plynů v atmosféře. Rozsah dopadu úpravy korunou na horní vrstvu polymeru nebyl jednoznačně stanoven. Uvádí se, že činí maximálně 10 nm [21].

### 1.2.2 Plasma

Zdroj [22] uvádí, že pokud vystavíme molekuly plynu velkému množství energie, tak se ionizují (ztratí jeden nebo více elektronů) a mají kladný náboj. Když je ionizováno dostatečné množství molekul, aby ovlivnily celkové elektrické vlastnosti plynu, tak výsledkem tohoto procesu je plasma. Plasma je proto často označována jako čtvrté skupenství hmoty. Plasma obsahuje kladné ionty, elektrony, atomy nebo molekuly neutrálního plynu, UV záření a také atomy a molekuly excitovaného plynu, které mohou nést velké množství vnitřní energie (když excitované neutrální částice zrelaxují do nižšího energetického stavu, tak emitují světlo a plasma díky tomu září). Všechny tyto součásti mohou během ošetření plasmou reagovat s povrchem upravovaného materiálu. Volbou směsi plynů, výkonu a tlaku můžeme poměrně přesně specifikovat účinky ošetření materiálu plasmou.

Úpravu plasmou dále popisuje zdroj [23]. Po mnoho let byla úprava korunou nejúčinnějším a cenově nejvýhodnějším řešením povrchové úpravy materiálů, a ve více než 95 % případů tomu tak je i dnes. Ale s příchodem složitějších a sofistikovanějších materiálů, má zbylých 5 % materiálů speciální požadavky, kterým je složité vyhovět.

Úprava volné povrchové energie povrchu plasmou, potřebuje oproti úpravě korunou, která se provádí v okolním vzduchu (modré skupiny na Obrázku 9), řízenou atmosféru a ke štěpení využívá malé množství dopantového plynu (červené skupiny na Obrázku 9). Díky tomu poskytuje úprava plasmou jinou škálu povrchových vlastností než korona.



Obrázek 8: Tvorba funkčních skupin při úpravě koronou (vlevo) a tvorba funkčních dusíkatých skupin (podle složení dusíkové atmosféry) při úpravě plasmou (vpravo) [23]

Zdroj [23] dále popisuje, jak štěpení probíhá ve 100% kontrolované atmosféře na bázi dusíku. Ta vytváří funkční skupiny na bázi dusíku na povrchu upravovaného materiálu. Smícháním s jinými plyny, označovanými jako dopanty, se vytvářejí další skupiny a množství požadovaných aminových, amidových a imidových skupin lze určovat dle potřeby. Tímto způsobem je možné upravit chemické složení povrchu a dosáhnout tak vysokého povrchového napětí. To umožňuje dobrou přilnavost mezi povrchem materiálu a barvou, lakem nebo lepidlem, které je na něj nanášeno. Díky možnosti více kontrolovat proces úpravy, poskytuje úprava plasmou vyšší úroveň povrchového napětí a jeho hodnota v čase klesá výrazně pomalejším tempem. Plasma je homogennější a považuje se za šetrnější formu povrchové úpravy oproti koroně. Má nižší tepelný dopad na povrch materiálu, což umožňuje obsluhu specifickěji upravit chemické složení povrchu.

### 1.2.3 Plamen

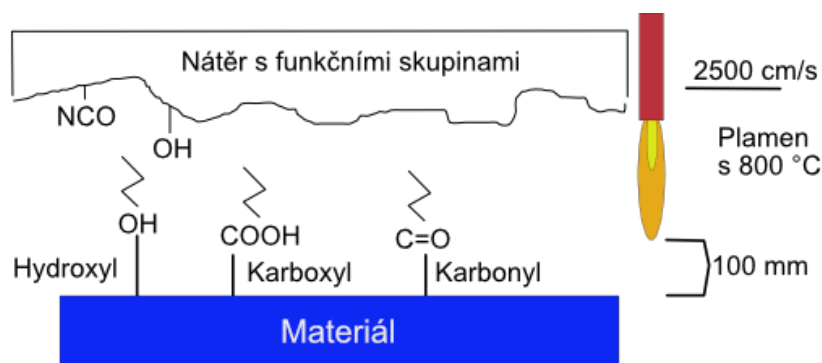
Ošetření plamenem, které je podrobněji popsáno ve zdroji [24], je proces používaný k úpravě chemických vlastností povrchu, za účelem zlepšení jeho přilnavosti. Tento proces se obvykle používá pro úpravu nízkoenergetických povrchů, které mají horší adhezi, což mohou být například plasty a kompozitní materiály. Ošetření povrchu plamenem je velmi šetrné, riziko poškození materiálu je velmi nízké. Využívá připravenou směs zemního plynu a vzduchu k vytvoření horké plasmy bohaté na kyslík. V prvním kroku teplo odstraňuje nečistoty, po odstranění nečistot, aktivuje plasma částečnou oxidaci povrchu materiálu. Na konci vznikne čistý povrch s vysokou volnou povrchovou energií, který je ve stavu vhodném pro úpravu tiskem, lakováním, potahováním nebo lepením. Úprava povrchu plamenem se používá v celé řadě průmyslových odvětví, a to u fólií a flexibilních obalů, spotřebního zboží, v automobilovém průmyslu, potisku textilu, a dokonce i v letectví. Ošetření plamenem lze použít na celou plochu materiálu nebo i na menší, specifickou část povrchu. Je zvláště užitečný díky své možnosti jednotné úpravy povrchu a schopnosti ošetřovat různé materiály, od lepenky až po kompozity.

Ošetření plamenem je podle zdroje [25] metoda, při které exotermní reakce mezi kyslíkem a palivem na bázi plynu vytváří tepelně aktivované radikály atomů a molekul (např. O radikál, OH radikál, NH radikál, NO radikál a CN radikál). Nejpoužívanějšími plyny při ošetření povrchu plamenem jsou propan, zemní plyn nebo například metan a butan.

Plamen dělíme na tři zóny: předspalovací zóna (modrý vnější kužel plamene), hlavní reakční zóna (tmavě modrý střední kužel plamene) a pospalovací zóna (světle modrý vnitřní kužel plamene) [25]. Oblast předspalování je nejchladnější částí plamene, protože množství uvolněné

energie (tepla) je ještě nízké. Pro povrchovou úpravu se používá hlavní reakční zóna, protože tato zóna má nejvyšší teplotu a také počet oxidačních činidel. Plamen dosáhne nejvyšší teploty (1900–2000 °C), když všechnen propan zreaguje se vzduchem. Koncentrace oxidačních činidel dosahuje maxima těsně před dospalovací zónou.

Reaktivní chemické skupiny z plamene plynu rozštěpí chemické vazby v molekule materiálu a v místě štěpení se napojí (Obrázek 10), což má za následek zvýšení počtu polárních skupin na povrchu materiálu, a tím pádem i zvýšení volné povrchové energie materiálu [25]. To zajišťuje lepší smáčení a adhezi tiskové barvy k materiálu.



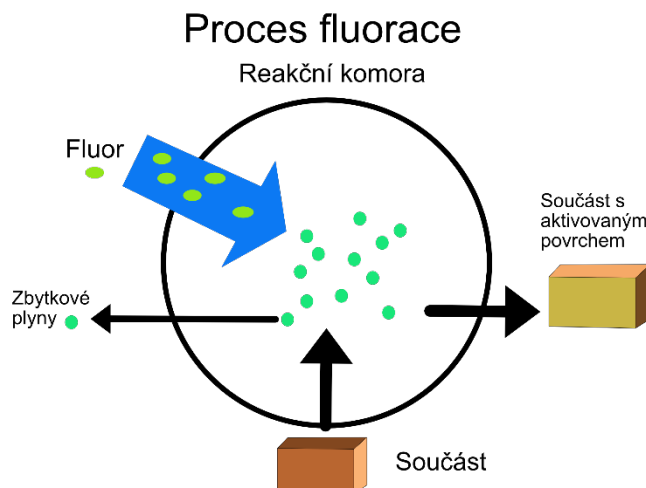
Obrázek 9: Schéma úpravy plamenem a znázornění interakcí mezi chemickými skupinami polymeru a nátěru [26]

#### 1.2.4 Fluorace

Poslední metodou úpravy povrchu materiálu, která je v této práci představena blíže, je metoda úpravy povrchu pomocí fluorace.

Zdroje [27, 28] popisují, že fluorace je metoda úpravy povrchu materiálu, která dokáže změnit vlastnosti materiálu a neovlivňuje jeho tepelné a mechanické vlastnosti. Vlastnosti povrchu dosažené pomocí fluorace jsou velmi stabilní. Mezi tyto vlastnosti patří výborná smáčivost, dobrý koeficient tření, vyšší přilnavost a také bariérové vlastnosti. Fluorace povrchů se úspěšně využívá při lakování, potisku, semišování a kaširování. S fluorací se můžeme setkat v oblastech obalové techniky, stavebního průmyslu, automobilového průmyslu, elektrotechniky, textilního průmyslu a také třeba v letectví a kosmonautice.

Proces fluorace, blíže popsán ve zdrojích [27, 28], spočívá ve vystavení ošetřovaných dílů působení fluoru v reakční (vakuové) komoře (Obrázek 10). Při fluoraci dochází při chemické reakci k postupnému nahrazení atomů vodíku atomy fluoru. Lze řízeně regulovat počet nahrazovaných atomů, a tím lze dosáhnout vlastností, které požadujeme. Mezi tyto vlastnosti můžeme zařadit, mimo už výše zmíněné, výbornou potisknutelnost, lepidlost a lakovatelnost. Proces fluorace je obecně jednoduchý a snadno se kontroluje jeho průběh.



*Obrázek 10: Popis procesu fluorace [27]*

### 1.3 Polymerní materiály používané pro tisk

Povrchové vlastnosti polymerů mají přímý vliv na klíčové vlastnosti materiálu, jako je smáčení, adheze, tření a biokompatibilita, a tím ovlivňují použitelnost polymerních materiálů [29]. Povrchové vlastnosti se v mnoha ohledech odlišují od vnitřních vlastností materiálu. Povrch polymerního materiálu je závislý na čase a teplotě, tj. vlastnosti jeho povrchu se v čase a v závislosti na teplotě mění. Z tohoto hlediska se povrch polymeru může kontinuálně měnit v reakci na různé vnější faktory, jako je atmosféra, rozpouštědlo apod.

Některé polymerní materiály, jak je uvedeno ve zdroji [30], mají nedostatečně vysoké povrchové napětí, což brání efektivnímu smáčení materiálu kapalinami a dobré adhezi. Pro dosažení lepší kvality tisku, laminace a nátěrů je tedy potřeba zvýšit jejich volnou povrchovou energii. Změna volné povrchové energie není trvalá, protože upravené materiály se s časem vracejí k původním hodnotám povrchové energie před provedením úpravy. Rychlost, jakou se povrchová energie snižuje, závisí na druhu použitého materiálu, zvolené metodě úpravy povrchu a také délce doby úpravy povrchu materiálu. V Tabulce 2 jsou uvedeny hodnoty povrchového napětí vybraných polymerních materiálů.

Existují různé metody úpravy volné povrchové energie, jako je například úprava pomocí korony, plamenem, fluorací nebo plasmatem. V předchozí kapitole 1.2 je podrobně popsáno, jak se jednotlivé metody využívají k úpravě povrchu polymerních materiálů.

*Tabulka 2: Povrchové napětí vybraných polymerních materiálů [1]*

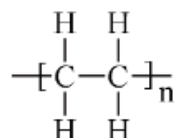
Polymerní materiál	Povrchové napětí [ $\text{mNm}^{-1}$ ]
PE (polyethylen)	32,4–35,7
PP (polypropylen)	29,4–30,1
PS (polystyren)	40,7
PET (polyethylentereftalát)	44,6



## Polyethylen (PE)

Polyethylen je termoplastický polymer, který patří do skupiny polyolefinů. Je vyrobený z etylenu, který je monomerem, a polymerizuje se za pomoci speciálních katalyzátorů [31]. Polyethylen má vysokou pevnost, nízkou hustotu a dobrou chemickou odolnost. Je také netoxický a recyklovatelný, což ho činí široce používaným materiálem v různých odvětvích. Nejčastěji se používají dva hlavní typy: vysokohustotní polyethylen (HDPE) a nízkohustotní polyethylen (LDPE). HDPE má vyšší hustotu a vyšší teplotní odolnost než LDPE. Je tvrdší a pevnější, což mu umožňuje odolávat vyšším tlakům a mechanickému namáhání. HDPE se často používá na přípravu potrubí, kontejnerů na chemikálie, izolaci kabelů, nádob na potraviny a v dalších aplikacích, které vyžadují odolnost a pevnost. LDPE má nižší hustotu a vyšší pružnost než HDPE. Je měkčí a pružnější, což mu umožňuje snadnou formovatelnost. LDPE se často používá v obalech, fóliích, sáčcích na potraviny, hračkách a různých plastových výrobcích, které vyžadují pružnost a dobré těsnění.

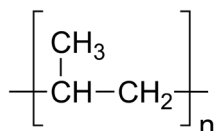
Polyethylen je oblíbeným materiálem díky své nízké ceně, snadnému zpracování a všestranným vlastnostem [31]. Má širokou škálu použití v průmyslu, zemědělství, obalovém průmyslu, stavebnictví, lékařství a dalších odvětvích. V polygrafii je možné jej využít jako laminační fólii nebo třeba jako potiskovatelný materiál pro flexotisk, hlubotisk, sítotisk a knihtisk [32]. Na Obrázku 11 je zobrazen strukturní vzorec polyethylenu.



Obrázek 11: Strukturní vzorec polyethylenu (PE)

## Polypropylen (PP)

Polypropylen také patří mezi polyolefiny. Je vyroben z monomeru propylenu a polymerizuje se za pomoci speciálních katalyzátorů [33]. Polypropylen je známý pro svou vysokou pevnost, tuhost a chemickou odolnost. Má také nízkou hustotu, díky tomu je velmi lehký. Polypropylen je široce využíván v obalovém průmyslu, automobilovém průmyslu a lékařství. Je odolný vůči vlivům životního prostředí, odolává chemikáliím a má dobré tepelně izolační vlastnosti. Polypropylen je také recyklovatelný. V oblasti polygrafie se využívá k potisku pomocí sítotisku, hlubotisku, flexotisku a knihtisku, také jej lze použít jako smršťovací fólii a obalový materiál [32]. Na Obrázku 12 je zobrazen strukturní vzorec polypropylenu.

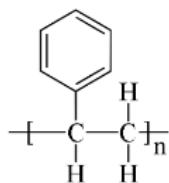


Obrázek 12: Strukturní vzorec polypropylenu (PP)

## Polystyren (PS)

Zdroj [34] uvádí, že polystyren je termoplastický polymer, který se používá v různých odvětvích díky své lehkosti, izolačním vlastnostem a snadnému zpracování. Je vyrobený z monomeru styrenu a polymerizuje se za použití speciálních katalyzátorů. Polystyren se často

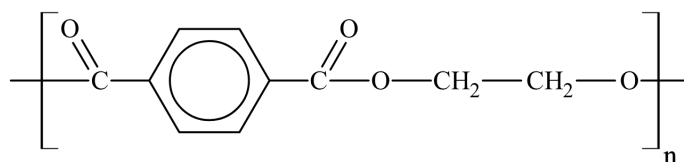
využívá jako tepelná izolace, obalový materiál a v oblastech stavebnictví, elektroniky, zdravotnictví a výrobním průmyslu. Jeho hlavní využití v oblasti polygrafie je při výrobě obalů, lepidel a fólií [32]. Na Obrázku 13 je zobrazen strukturní vzorec polystyrenu.



Obrázek 13: Strukturní vzorec polystyrenu (PS)

### Polyethyltereftalát (PET)

Polyethyltereftalát je termoplast ze skupiny polyesterů [35]. Mezi jeho vlastnosti řadíme dobrou pevnost, průhlednost a lehkost. PET je vyráběn z etylenglykolu a kyseliny tereftalové. Hlavní využití nachází v potravinářském průmyslu jako obalový materiál pro jídlo a nápoje, což odpovídá i jeho hlavnímu využití v polygrafickém průmyslu, kde je používán jako obalový materiál. Dále je možné jej využít např. v automobilovém průmyslu a zdravotnictví.



Obrázek 14: Strukturní vzorec polyethyltereftalátu (PET)

## 2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 2.1 Polymerní fólie

#### Polyethylenová fólie GRANOTEN® O

Fólie GRANOTEN je vyráběna firmou Granitol. Jedná se o jednovrstvou nesmrštitelnou fólii z LDPE (nízkohustotního polyethylenu) [36]. Tloušťka této fólie je 60  $\mu\text{m}$ . Hlavní využití fólie je jako balicí materiál zboží bez tepelného smrštění, konkrétně se jedná například o papírové hygienické potřeby (toaletní papír, papírové kuchyňské utěrky a další), brikety, pelety a uhlí. Využití má také v polygrafickém zpracování např. při laminaci. Fólii lze potisknout až 10 barvami a její tepelná odolnost je od  $-50\text{ }^\circ\text{C}$  až do  $+85\text{ }^\circ\text{C}$ .

### 2.2 Testovací kapaliny

Měření kontaktních úhlů na použitých vzorcích polyethylenu bylo provedeno pomocí tří různých kapalin od firmy Sigma-Aldrich. Jednalo se o ethylenglykol, formamid a diiodmethan. Čtvrtou použitou kapalinou pro testování byla destilovaná voda.

#### Ethylenglykol, bezvodý

Jedná se o kapalinu bez chuti a zápachu [37]. Molekulová hmotnost ethylenglykolu je 62,07 g/mol. Ethylenglykol se používá v celé řadě kosmetických nebo pracích přípravků, barev, rozpouštědel a plastů. Dále je možné jej také použít do nemrznoucích směsí [38]. Pro experimentální část byl použit ethylenglykol o čistotě 99,8 %.

#### Formamid

Formamid je bezbarvá kapalina se zápachem připomínajícím amoniak [39]. Jeho hlavní využití je při výrobě léčiv. Molekulová hmotnost formamidu je 45,04 g/mol. V experimentální části byl použit formamid o čistotě  $\geq 99,5\%$ .

#### Dijodmethan ReagentPlus®

Jako poslední kapalina byl v experimentální části práce použit diiodmethan, který obsahuje měď jako stabilizátor a díky přítomnosti jódu má nahnědlou barvu a velice charakteristický zápach [40]. Pro měření byl použit diiodmethan o čistotě 99 % s molekulovou hmotností 267,84 g/mol.

### 2.3 Testovací fixy a inkousty

V experimentální části, ještě před samotným měřením kontaktních úhlů za pomoci již zmíněných kapalin, byly jako první pro testování použity testovací fixy a inkousty od firmy Arcotest s definovaným povrchovým napětím. Byly použity dva různé druhy fixů a inkoustů, a to s označením PINK a BLUE. Fixy a inkousty s označením PINK jsou růžově zbarvené (jak již napovídá jejich název), oproti tomu fixy a inkousty s označením BLUE, jsou zbarvené modře. Fixy se liší složením aktivních látek. Růžové jsou označovány jako netoxické a modré jako „toxické“ a je potřeba být při práci s nimi opatrný [41]. Modré fixy a inkousty jsou znázorněny na Obrázku 5. Oba druhy inkoustů splňují normu DIN 53364 respektive ISO 8296.

### **Testovací fixy PINK arcotest®**

Testovací fixy PINK byly použity pro měření volné povrchové energie polyethylenu. Celkem bylo použito 8 fixů a jejich povrchové napětí bylo v rozsahu 30 až 44 mN/m s krokem 2 mN/m. Přesnost těchto fixů se pohybuje v rozmezí  $\pm 1$  mN/m. Jejich výhodou je snadná manipulace, oproti inkoustům nehrozí rozlití kapaliny [41].

### **Testovací fixy BLUE arcotest®**

Druhý typ testovacích fixů, které byly použity pro měření volné povrchové energie polyethylenu, byly fixy s označením BLUE. Celkem bylo použito 10 fixů s povrchovým napětím v rozmezí od 28 mN/m do 46 mN/m. Přesnost se také pohybuje okolo  $\pm 1$  mN/m [41]. Byly použity až v pozdější fázi měření, kdy přišlo nové balení těchto fixů a díky tomu nebyly opotřebované jako fixy PINK.

### **Testovací inkousty PINK arcotest®**

Testovací inkousty PINK jsou dostupné v lahvičkách o objemu 10, 100 a 250 ml [40]. Byly použity inkousty s povrchovým napětím od 28 mN/m do 44 mN/m s krokem 2 mN/m. Přesnost testovacích inkoustů je vyšší, a pohybuje se okolo  $\pm 0,5$  mN/m. Manipulace s inkousty je oproti fixům horší, jelikož se mohou rozlít a manipulace s nimi je obtížnější. Při nanášení na materiál je potřeba nanést tenkou vrstvu inkoustu. Stejně jako fixy PINK jsou netoxické [41].

### **Testovací inkousty BLUE arcotest®**

Jako poslední byly při měření použity testovací inkousty BLUE. Vyrábí se v lahvičkách o stejném objemu, jako předchozí inkousty PINK. Stejně jako u inkoustů PINK, byly pro měření použity inkousty s povrchovým napětím od 28 mN/m do 44 mN/m s krokem 2 mN/m. Přesnost je také stejná. Inkousty BLUE jsou stejně jako fixy BLUE „toxické“ [41]. Inkousty BLUE byly také použity v pozdější fázi měření a pro měření byla použita úplně nová sada těchto inkoustů.

## **2.4 Použité přístroje a vybavení**

Pro úpravu materiálů a následné měření volné povrchové energie byly v této práci použity následující přístroje.

### **2.4.1 Koronovací zařízení Lab Treator ASL 400 TUM**

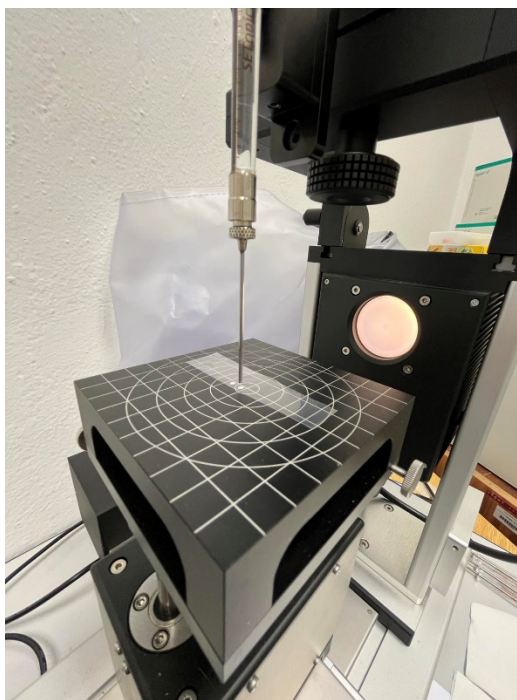
Koronovací zařízení Lab Treator ASL 400 TUM (Obrázek 15) od firmy Ahlbrandt bylo použito k úpravě polyethylenové polymerní fólie. Toto zařízení obsahuje korunovací hlavu s dvěma keramickými elektrodami, jejichž rychlost pohybu lze upravit dle potřeby. Toto stolní zařízení pracuje na principu, kdy korunovací jednotka přejíždí nad upravovaným materiálem. Upravovaný materiál je přichycen ke spodní hliníkové desce, která funguje také jako protielektroda. Pro úpravu polyethylenové fólie byla rychlost pohybu korunovací hlavy nastavena na 10 m/min a výkon korony byl nastaven na 800 W. Výkon lze nastavit v rozsahu 400 až 800 W s krokem 50 W. Kvůli vznikajícímu ozónu je vzduch z prostoru elektrod odsáván, takže je nutné vzorky přilepit k hliníkovému stolu, aby nedošlo k jejich posunu a přisátí k elektrodám.



*Obrázek 15: Koronovací zařízení Lab Treator ASL 400 TUM*

#### **2.4.2 Přístroj OCA 50 pro měření kontaktního úhlu**

OCA 50 je plně automatický přístroj, který se využívá pro měření kontaktního úhlu, smáčivosti povrchů a pro následné stanovení volné povrchové energie pevných látek [42]. Součástí tohoto přístroje je ovládací panel s dotykovou obrazovkou a ovládacím kolečkem. Obsahuje také nastavitelný stůl na vzorky, zvětšovací objektiv, průběžné zaostřování, možnost nastavit úhel pozorování a také video systém, který je připojen pomocí USB portu. Přístroj je řízen pomocí softwaru SCA20 a lze v něm nastavit požadovaný objem vytlačované kapaliny. Tento přístroj byl použit pro měření kontaktního úhlu metodou přisedlé kapky (Obrázek 16). Pomocí kamery byl nasnímán obraz kapky po jejím dopadu na polymerní materiál. Výsledný obraz z kamery byl zpracován v softwaru SCA20, kde bylo také provedeno vyhodnocení kontaktního úhlu u nasnímané kapky. Pro nanášení kapek kapalin pomocí přístroje OCA 50 na polyethylenovou fólii, která byla v rámci tohoto měření zkoumána, byla použita stříkačka značky SETonic (500  $\mu$ l).



Obrázek 16: Průběh měření kontaktního úhlu přístrojem OCA 50

## 2.5 Postup měření a příprava polyethylenové fólie pro měření

Měření bylo prováděno na korunou neupravené i korunou upravené polyethylenové fólii. Neupravená PE fólie byla měřena nepravidelně, a to v časovém rozmezí roku a půl. První měření neupravené PE fólie bylo provedeno 30. 11. 2021, jednalo se o první testovací měření, při kterém se zjišťovalo, jakým způsobem měření provádět a jak provést jeho vyhodnocení pomocí přístroje OCA 50. Upravená PE fólie koronovacím zařízením se poprvé měřila až 2. 5. 2022. Poslední měření upravené i neupravené PE fólie bylo provedeno 30. 3. 2023.

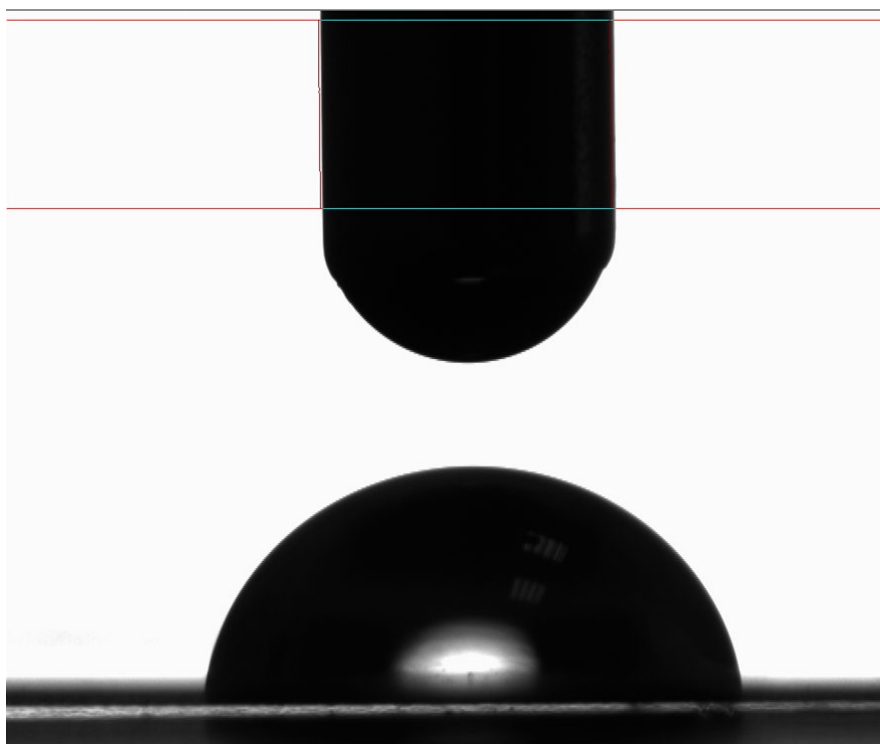
Polyethylenová fólie byla upravována korunou z vrchní i spodní strany. Koronovací zařízení ASL 400 TUM použité k úpravě PE fólie mělo nastaven výkon na 800 W a rychlost pohybu koronovací hlavy byla 10 m/min. První měření bylo provedeno u materiálu, nad kterým projela koronovací hlava pouze jednou (tam a zpátky). Při dalších měřeních bylo průjezdů koronovací hlavy nad vzorkem celkem 6 (3× tam a 3× zpátky).

Než byla polyethylenová fólie upravena korunou, byla nastříhána na vzorky o velikosti 30 × 10 cm, takto velké vzorky byly v prvním kroku očištěny ethanolem a přilepeny na koronovací stůl po obvodu vzorku pomocí lepicí pásky. Následně proběhla úprava vzorků korunou. Po upravení byly z těchto větších vzorků stříhány menší vzorky o rozměrech přibližně 1 × 10 cm pro měření kontaktních úhlů v zařízení OCA 50. Vzorky byly stříhány kolmo k pohybu koronovací hlavy, tj. delší strana vzorku (30 cm) byla rovnoběžná k pohybu koronovací hlavy. Nastříhání na stejně velké vzorky probíhalo i pokud se PE fólie neupravovala korunou a rovnou se měřila.

Kapaliny byly natahovány do již zmíněné stříkačky SETonic. Před každým použitím se musela stříkačka nejprve propláchnout stejnou kapalinou, která byla následně použita při měření. Vypláchnutí stříkačky probíhalo z toho důvodu, aby se předešlo kontaminaci jinou kapalinou a nedošlo díky tomu ke zkreslení výsledků měření.

Pro měření kontaktních úhlů byla zvolena výsledná hodnota objemu kapky 3  $\mu\text{l}$ , z tohoto důvodu byl v softwaru SCA20 nastaven objem vytlačované kapaliny na 5  $\mu\text{l}$ , což v konečném důsledku vedlo ke kapkám na PE fólii o objemu přibližně 3  $\mu\text{l}$ .

Vzorky polyethylenu, upravené i neupravené korunou, o velikosti 1  $\times$  10 cm byly vkládány do přístroje OCA 50, kde byly měřeny metodou přisedlé kapky. Tato metoda spočívá ve vytlačení potřebného objemu kapaliny na povrch vzorku. Kapalina byla vytlačována pomocí mikrostříkačky SETonic. Na základě příkazu v softwaru SCA20 zařízení vytlačilo potřebné množství kapaliny ze stříkačky (visící kapka) a pohybem celé mikrostříkačky směrem ke vzorku a dotykem s kapkou byla kapalina oddělena od stříkačky a vytvořila kapku na testovaném materiálu. Po nanesení kapky se počkalo cca 2 sekundy, než se kapka ustálí (Obrázek 17) a následně proběhlo měření kontaktního úhlu jednotlivých kapek pomocí přístroje OCA 50 a jeho softwaru SCA20. Měření kontaktního úhlu kapky probíhalo následovně: kapka dopadla na povrch polyethylenové fólie a v programu SCA20 bylo stisknuto tlačítko pro snímání kapky. Při jednom měření bylo celkem pořízeno 12 snímků jedné kapky (měření trvalo cca 10 sekund) a software vypočítal hodnoty kontaktního úhlu pro všechny snímky z jednoho měření. Jakmile bylo měření kapky dokončeno, data z programu se zkopírovala do připravené excelovské tabulky, kde se prováděl výpočet průměrné hodnoty kontaktního úhlu. Při měření jednoho pásku vzorku byly použity minimálně tři kapky, a to z toho důvodu, aby bylo dosaženo co nejpřesnějších výsledků (většinou ale bylo nanášeno kapek 5). Tímto způsobem probíhalo měření pro každou z kapalin, vždy se nanasly a proměřily minimálně tři kapky, a to jak pro vrchní stranu, tak pro spodní stranu. Vrchní strana PE fólie byla již z výroby určitým způsobem upravena, a tím pádem měla vyšší volnou povrchovou energii než spodní strana PE fólie, která upravena nebyla.



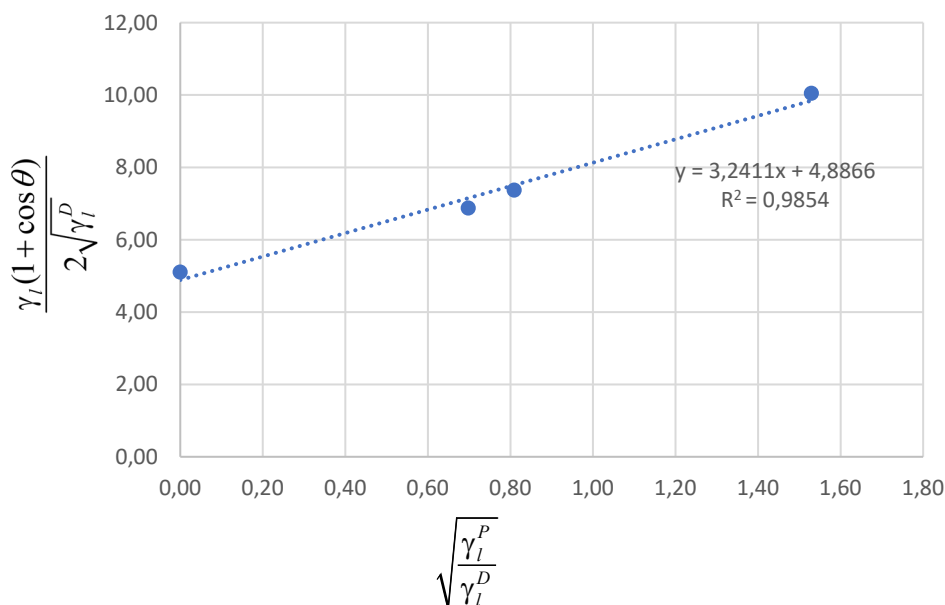
*Obrázek 17: Snímání kapky kapaliny v programu SCA20*

V excelu již probíhal samotný výpočet volné povrchové energie za pomoci metody OWRK. Z 12 hodnot kontaktního úhlu dané kapky kapaliny byla vždy vypočtena jedna průměrná

hodnota. Tento výpočet se prováděl vždy pro minimálně 3 kapky od každé ze 4 kapalin. Průměrná hodnota kontaktního úhlu kapky pro každou z kapalin, byla určena jak pro kapky nanášené na spodní stranu, tak i na vrchní stranu testované PE fólie. Následně byla pro každou z kapalin určena průměrná hodnota jejího kontaktního úhlu pro všechny kapky dané kapaliny (opět pro obě strany PE fólie). Rovnici 4 z metody OWRK je možné vyjádřit jako rovnici přímky ( $y = mx + c$ ) a díky tomu lze vyhodnotit více kapalin pomocí lineární regrese. Úpravou na rovnici přímky nám vznikne Rovnice 7.

$$\frac{\gamma_l(1 + \cos \theta)}{2\sqrt{\gamma_l^D}} = \sqrt{\gamma_s^P} \times \sqrt{\frac{\gamma_l^P}{\gamma_l^D}} + \sqrt{\gamma_s^D} \quad (7)$$

Do Rovnice 7 byly následně dosazeny hodnoty kontaktního úhlu, tabelované hodnoty povrchového napětí a polární a disperzní složky testovací kapaliny. Z rovnice přímky se po dosazení vypočetly hodnoty x a y pro každou z kapalin. Hodnotě y odpovídá v Rovnici 7 její levá část a hodnotě x odpovídá druhý člen vpravo. Pro výpočet hodnoty y je potřeba znát hodnotu povrchového napětí kapaliny ( $\gamma_l$ ), disperzní složku ( $\gamma_l^D$ ) povrchového napětí kapaliny a kontaktní úhel ( $\theta$ ), pro výpočet hodnoty x je potřeba znát polární ( $\gamma_l^P$ ) a disperzní ( $\gamma_l^D$ ) složku povrchového napětí kapaliny. Následně byly tyto hodnoty vyneseny do grafu a proloženy lineární spojnici trendu. Hodnota m získaná z rovnice přímky výsledného grafu představuje odmocninu polární složky PE fólie a hodnota c představuje odmocninu disperzní složky PE fólie (Obrázek 18). Sečtením polární a disperzní složky byla získána výsledná hodnota volné povrchové energie PE fólie. Tento postup byl proveden jak pro spodní, tak pro vrchní stranu PE fólie.



Obrázek 18: Ukázka grafického vyhodnocení metody OWRK pro vrchní stranu PE fólie (neupravenou koronou) pro testovaný vzorek z 6. 4. 2022

Kromě měření kontaktních úhlů pomocí jednotlivých kapalin bylo také provedeno měření volné povrchové energie polyethylenové fólie za pomoci testovacích fixů a inkoustů (PINK a BLUE) značky Arcotest.



## 2.6 Výsledky a diskuse

Volná povrchová energie PE fólie byla vyhodnocována pomocí kontaktních úhlů jednotlivých kapalin. Měření bychom mohli rozdělit do dvou skupin, a to na měření PE fólie před upravením pomocí korony a na měření PE fólie po úpravě korunou, tj. po změně její volné povrchové energie.

### Měření PE fólie před úpravou korunou

Polyethylenová fólie byla před samotným upravováním korunou proměřena celkem pětkrát. Z těchto pěti měření, byly první dvě měření pouze testovací, kdy probíhalo seznámení s měřicím přístrojem OCA 50, jaké parametry je potřeba nastavit v softwaru SCA20 a jakým způsobem pracovat s mikrostříkačkou SETonic a jednotlivými kapalinami. Kromě prvotních pěti měření, které byly provedeny v časovém horizontu pěti měsíců, byla v průběhu měření korunou upravených fólií provedena další měření neupravené PE fólie, a to celkem třikrát v časovém horizontu šesti měsíců. Kromě měření volné povrchové energie pomocí měření kontaktních úhlů, proběhlo určení volné povrchové energie také za pomoci testovacích fixů a kapalin. V Tabulce 3 můžeme pozorovat hodnoty volné povrchové energie zjištěné pomocí testovacích fixů a kapalin (PINK) pro vrchní a spodní stranu PE fólie.

*Tabulka 3: Ukázka tři měření volné povrchové energie u neupravené PE fólie pomocí testovacích fixů a kapalin (PINK)*

Měření	Vrchní strana		Spodní strana	
	Fixy [mJ/m <sup>2</sup> ]	Kapaliny [mJ/m <sup>2</sup> ]	Fixy [mJ/m <sup>2</sup> ]	Kapaliny [mJ/m <sup>2</sup> ]
14. 12. 2021	38	42	30	30
3. 2. 2022	38	38	30	30
6. 4. 2022	38	36	30	30

První měření neupravené PE fólie, které již bylo pro náš výzkum relevantní, bylo provedeno 14. 12. 2021. Pro toto měření byly použity pouze dva vzorky pro vrchní stranu a dva vzorky pro spodní stranu PE fólie. V Tabulce 4 jsou uvedeny vypočítané hodnoty volné povrchové energie pomocí metody OWRK, a to jak pro vrchní, tak pro spodní stranu neupravené PE fólie v celém průběhu zpracování bakalářské práce. V prvním sloupci se nachází datum, o které měření se jedná, ve druhém a čtvrtém sloupci jsou uvedeny hodnoty průměrné volné povrchové energie měřených vzorků pro vrchní i spodní stranu PE fólie. Třetí a pátý sloupeček udává výběrovou směrodatnou odchylku jednotlivých měření.

*Tabulka 4: Průměrné hodnoty volné povrchové energie ( $\sigma_s$ ) u neupravené PE fólie pro vrchní a spodní stranu a její výběrová směrodatná odchylka ( $s$ )*

Měření	Vrchní strana		Spodní strana	
	$\sigma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]
14. 12. 2021	35,0	2,3	30,3	0,1
3. 2. 2022	35,7	1,0	26,5	0,6
6. 4. 2022	33,8	1,4	26,3	0,8
19. 10. 2022	33,2	1,6	26,2	0,4
1. 2. 2023	31,0	2,0	27,0	1,4
30. 3. 2023	29,4	0,3	27,8	0,2

Z hodnot v Tabulce 4 lze vidět, že vrchní strana PE fólie má na počátku vyšší volnou povrchovou energii než spodní strana, a to o cca  $5 \text{ mJ/m}^2$ . Tento rozdíl, jak již bylo zmíněno v úvodní kapitole, je způsoben tím, že vrchní strana PE fólie je již z výroby nějakým způsobem upravena a oproti tomu spodní strana upravena není. Při srovnání hodnot získaných pomocí měření kontaktních úhlů a pomocí testovací fixů a kapalin můžeme pozorovat rozdíl v hodnotách u vrchní strany PE fólie. Pomocí měření kontaktních úhlů byla určena hodnota volné povrchové energie o  $3\text{--}5 \text{ mJ/m}^2$  nižší než u testovacích fixů a dokonce o  $5\text{--}7 \text{ mJ/m}^2$  nižší než u testovacích kapalin. Tato odchylka mohla být způsobena chybou měření anebo také již více opotřebovanými testovacími fixami a kapalinami. Hodnota volné povrchové energie u spodní strany byla stejná jak při měření pomocí kontaktních úhlů, tak při určování pomocí testovacích fixů a kapalin. Hodnota ale poté v čase začala taktéž klesat, jako tomu je u vrchní strany.

Druhé měření volné povrchové energie u neupravené PE fólie bylo uskutečněno dne 3. 2. 2022. Při tomto měření byly proměřeny celkem dvě sady PE fólií (jedna sada pro vrchní stranu a druhá sada pro spodní stranu). Sada je tvořena čtyřmi vzorky o rozměrech  $30 \times 10 \text{ cm}$ . Při srovnání hodnot měření z 3. 2. 2022 s hodnotami získanými při prvním měření, můžeme pozorovat, že průměrná hodnota volné povrchové energie vrchní strany PE fólie se u obou měření téměř neliší (rozdíl daný chybou měření). Co se týče hodnoty volné povrchové energie u spodní strany, tak u ní pozorujeme při druhém měření pokles o téměř  $4 \text{ mJ/m}^2$ . Určování volné povrchové energie pomocí testovacích fixů a kapalin je uvedeno v Tabulce 3, kde vidíme, že u vrchní strany PE fólie byla hodnota volné povrchové energie, která byla zjištěna testovacími fixami, o  $3 \text{ mJ/m}^2$  vyšší a u testovacích kapalin taktéž. Hodnoty u spodní strany byly u testovacích fixů o cca  $4 \text{ mJ/m}^2$  vyšší a stejně tomu bylo i u testovacích kapalin. Z tohoto lze usuzovat, že měření pomocí testovacích fixů a kapalin udává o něco vyšší hodnoty volné povrchové energie, než pomocí kontaktních úhlů a jsou vhodné pro orientační měření v případě absence měřicího přístroje nebo nezkušenosti laboranta. Z tohoto důvodu byly obě sady testovacích fixů a kapalin (PINK i BLUE) používány především pro zjišťování, zda se jedná o vrchní nebo spodní stranu PE fólie, abychom věděli, kterou stranu zrovna korunujeme a nedošlo k jejich záměně.

Třetí měření neupravené PE fólie bylo provedeno před začátkem prvního koronování vzorků. Toto měření bylo uskutečněno 6. 4. 2022 a měření bylo tentokrát prováděno pro tři vzorky pro vrchní a spodní stranu PE fólie. Hodnoty volné povrchové energie z tohoto měření se vůči předešlému měření u spodní strany neliší a nepozorujeme zde významný pokles nebo nárůst. Hodnota volné povrchové energie pro vrchní stranu sice mírně poklesla, ale vzhledem k hodnotě směrodatné odchylky vůči měření předešlému, můžeme hovořit o rozdílu v rámci chyby měření. Určení volné povrchové energie PE fólie pomocí testovacích fixů a kapalin dopadlo téměř totožně, jako u předešlého měření. Jediným rozdílem mezi těmito měřeními byla nižší hodnota volné povrchové energie u vrchní strany, určena pomocí testovacích kapalin. Rozdíl byl v tomto případě  $2 \text{ mJ/m}^2$ .

Kromě výše uvedených měření, byly v průběhu následujících deseti měsíců provedeny ještě tři kontrolní měření neupravené PE fólie. U měření neupravených fólií z 19. 10. 2022 a 1. 2. 2023 pozorujeme pokles volné povrchové energie u vrchní strany s krokem přibližně  $2 \text{ mJ/m}^2$ . Na úplný závěr byla naposledy proměřena neupravená PE fólie, a to dne 30. 3. 2023. Z tohoto měření vyplývá, že hodnota volné povrchové energie pro spodní stranu PE fólie zůstává

neměnná, zatímco u vrchní strany dále klesá, a to o další 2 mJ/m<sup>2</sup>. I u těchto čtyř měření bylo dále prováděno určení volné povrchové energie za pomoci testovacích fixů a kapalin.

Veškeré hodnoty volných povrchových energií včetně jejich polárních a disperzních složek jsou uvedeny v Příloze 1. Při bližším prozkoumání hodnot polárních a disperzních složek volné povrchové energie u jednotlivých měření z Přílohy 1 můžeme jasně vidět, že disperzní složka je oproti polární výrazně vyšší. Hodnoty polární složky u vrchní strany PE fólie jsou vyšší než u spodní strany PE fólie. Pro vrchní stranu PE fólie se polární složka v čase zmenšuje, zatímco disperzní zůstává na přibližně stejných hodnotách. Oproti tomu u spodní strany PE fólie zůstávají hodnoty polární a disperzní složky u všech měření přibližně stejné. Při posledním měření, provedeném dne 30. 3. 2023, je rozdíl mezi hodnotami polární a disperzní složky u vrchní strany PE fólie nejvýraznější a dostává se na stejné hodnoty, jaké jsou u spodní strany PE fólie.

Celkově můžeme říct, že u neupravené PE fólie také sledujeme změnu volné povrchové energie v čase, jelikož v Tabulce 3 a 4 pozorujeme u vrchní strany pokles hodnot volné povrchové energie v časovém rozmezí roku a půl. U spodní strany jsou hodnoty volné povrchové energie v čase konstantní. Lze tedy říct, že volná povrchové energie u vrchní strany (hlavně její polární složka), klesá v čase na hodnoty blížící se neupravené spodní straně PE fólie.

### **Měření PE fólie po úpravě korunou**

Další měření již probíhaly na PE fóliích, které byly nejprve upraveny korunou. Celkově bylo provedeno sedm různých měření vždy na nově koronovaných sadách PE fólií, u kterých bylo následně provedeno opakované měření volné povrchové energie v určitých časových odstupech od koronování.

### **Měření 1. sady PE fólie upravené korunou**

První měření koronované PE fólie bylo provedeno 2. 5. 2022. Při tomto měření byla PE fólie upravena v koronovacím zařízení s nastaveným výkonem 800 W. Vzorky PE fólie byly upraveny dvěma průjezdy koronovací hlavy (tam a zpět). V Tabulce 5 jsou uvedeny průměrné hodnoty volné povrchové energie z jednotlivých měření upravené PE fólie pro její vrchní a spodní stranu, vypočtené pomocí metody OWRK. Celkem bylo upraveno 20 vzorků o rozměrech 30 × 10 cm z vrchní strany a také ze spodní strany. Větší počet vzorků byl upraven z toho důvodu, aby bylo předpřipraveno dostatečné množství vzorků pro další měření v průběhu času. Jednotlivá měření koronované PE fólie ze dne 2. 5. 2022 (označení A) měřené v delším časovém horizontu po koronování (zde pět měsíců) jsou pro lepší přehlednost označeny v Tabulce 5 písmeny B až E.

Tabulka 5: Průměrné hodnoty volné povrchové energie ( $\sigma_s$ ) v čase u 1. sady koronované PE fólie pro vrchní a spodní stranu a její výběrová směrodatná odchylka (s)

Měření	Vrchní strana		Spodní strana	
	$\sigma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	s [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	s [mJ/m <sup>2</sup> ]
A (2. 5. 2022)	42,1	1,9	36,5	1,5
B (4. 5. 2022)	31,5	1,0	30,3	1,3
C (11. 5. 2022)	31,6	1,5	29,9	1,3
D (7. 6. 2022)	30,3	0,8	29,8	0,3
E (6. 10. 2022)	32,7	2,2	30,0	0,8

Volná povrchová energie pro měření A vrchní strany upravené PE fólie výrazně stoupla oproti hodnotám, které byly naměřeny u neupravených fólií. Nárůst byl o 7 mJ/m<sup>2</sup>. U spodní strany byl také pozorován nárůst volné povrchové energie, a to o cca 10,6 mJ/m<sup>2</sup>. Měření B upravené PE fólie bylo provedeno po dvou dnech od koronování. Toto měření nám mělo více přiblížit, jak se PE fólie chová v určitém časovém odstupu od samotné úpravy. Jak si můžeme všimnout, hodnota volné povrchové energie jak u vrchní, tak u spodní strany výrazně klesla oproti hodnotám, které byly naměřeny hned po koronování. Konkrétně u vrchní strany pozorujeme pokles o 10 mJ/m<sup>2</sup>, u spodní strany pozorujeme pokles o 6,2 mJ/m<sup>2</sup>. Díky tomuto měření bylo zjištěno, že volná povrchová energie koronovaného materiálu klesla u vrchní strany ještě níž, než byla původní volná povrchová energie naměřená u neupravené PE fólie. Z tohoto důvodu byly provedeny další měření s větším časovým odstupem a také měření nově koronované PE fólie, aby se zjistilo, jak rychle a o kolik hodnota volné povrchové energie klesne. Původní cíl měření zahrnoval pouze měření jedné koronované PE fólie, ale vzhledem k tomu, že pokles volné povrchové energie byl velice výrazný v krátkém časovém intervalu, tak se přistoupilo k měření nově koronovaných PE fólií v různých časových odstupech od jejich koronování. U měření C (měřeno devět dní po koronování) se hodnoty oproti měření B téměř nezměnily, rozdíly v hodnotách pro obě strany upravené PE fólie se pohybují v řádech desetin mJ/m<sup>2</sup>. Měření D a E (jeden měsíc a pět měsíců od koronování) se sice průměrnými hodnotami u vrchní strany mírně liší od měření B a C, ale vzhledem k hodnotě směrodatné odchylky je to rozdíl nevýznamný a měření B až E tak mají srovnatelné hodnoty volné povrchové energie. Vyšší průměrné hodnoty u měření E mohou být dány také tím, že toto měření probíhalo na jiných vzorcích o rozměrech 30 × 10 cm a mohlo tedy dojít k trochu jiné úpravě koronovacím zařízením nebo k nesprávnému nalepení vzorků na hliníkový stůl. U spodní strany PE fólie jsou hodnoty volné povrchové energie velmi podobné a hodnota volné povrchové energie je v čase stabilní.

Veškeré hodnoty volných povrchových energií včetně jejich polárních a disperzních složek jsou uvedeny v Příloze 2. Pokud se blíže podíváme na hodnoty polární a disperzní složky volné povrchové energie PE fólie tak zjistíme, že u měření A nám hodnota polární složky narostla jak u vrchní, tak u spodní strany PE fólie. Hodnota disperzní složky zůstává přibližně stejná. V následujících měřeních již hodnota polární složky postupně klesá, což odpovídá poklesu volné povrchové energie v čase. U měření E došlo k nárůstu polární složky, čímž došlo k nárůstu volné povrchové energie. Možné důvody tohoto nárůstu jsou popsány v odstavci výše.

## Měření 2. sady PE fólie upravené korunou

Měření 2. sady koronované PE fólie bylo provedeno 18. 5. 2022. U tohoto měření byla PE fólie upravena v koronovacím zařízení s nastaveným výkonem 800 W. V tomto případě byla PE fólie upravena celkem 6 průjezdy koronovací hlavy nad vzorky, a to z toho důvodu, že u přechodného Měření 1. sady PE fólie bylo zjištěno, že volná povrchová energie upravené PE fólie v čase klesla velmi rychle (do dvou dnů). Z tohoto důvodu byly navýšeny průjezdy koronovací hlavy nad upravovanými vzorky. V Tabulce 6 jsou uvedeny hodnoty volné povrchové energie koronované PE fólie pro její vrchní a spodní stranu vypočtené pomocí metody OWRK. Celkově byla 2. sada koronování PE fólie proměřena pětkrát. První měření proběhlo hned po koronování a poslední měření proběhlo 6. 10. 2022, tj. téměř po 5 měsících od koronování.

Tabulka 6: Průměrné hodnoty volné povrchové energie ( $\sigma_s$ ) v čase u 2. sady koronované PE fólie pro vrchní a spodní stranu a její výběrová směrodatná odchylka ( $s$ )

Měření	Vrchní strana		Spodní strana	
	$\sigma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]
A (18. 5. 2022)	43,2	1,4	41,6	0,8
B (20. 5. 2022)	31,8	0,9	34,4	1,4
C (26. 5. 2022)	31,1	1,1	30,6	1,1
D (24. 8. 2022)	28,2	0,6	28,7	0,7
E (6. 10. 2022)	29,6	0,7	27,9	1,0

Měření A bylo provedeno ihned po koronování PE fólie. Z naměřených hodnot vyplývá, že hodnota volné povrchové energie pro vrchní stranu stoupla podobně jako u Měření 1. sady PE fólie (Tabulka 5), kdy byla PE fólie korunou upravena jen dvěma průjezdy koronovací hlavy nad vzorky. Nárůst činil tedy pro vrchní stranu cca 8 mJ/m<sup>2</sup> vůči neupravené PE fólii. U spodní strany můžeme pozorovat nárůst o 15 mJ/m<sup>2</sup> oproti neupravené PE fólii. Z toho lze usuzovat, že ani navýšení průjezdů hlavy koronovacího zařízení nad vzorky PE fólie nepomohlo k výraznějšímu zvýšení volné povrchové energie PE fólie. Měření B bylo provedeno dva dny od koronování. Hodnoty volné povrchové energie klesly pro vrchní stranu o 11,4 mJ/m<sup>2</sup> a pro spodní stranu o 7,2 mJ/m<sup>2</sup> oproti měření A. Opakuje se v tomto případě stejný scénář jako u Měření 1. sady PE fólie, kde volná povrchová energie PE fólie také výrazně klesla po dvou dnech. Jediným rozdílem mezi těmito dvěma měřeními je, že díky většímu nárůstu volné povrchové energie u spodní strany je pokles u této strany nižší (hodnota 34,4 mJ/m<sup>2</sup> je stále vyšší než hodnota volné povrchové energie neupravené PE fólie). V dalších třech měřeních C až F, můžeme pozorovat postupný mírný pokles hodnot volné povrchové energie jak u vrchní, tak u spodní strany vzorků PE fólie. Jedinou výjimkou je měření E, kde naopak hodnota průměrné volné povrchové energie pro vrchní stranu mírně stoupla (o 1,4 mJ/m<sup>2</sup>). Tento mírný nárůst mohl být způsoben tím, že měření bylo provedeno pro menší počet vzorků (3), a to z časových důvodů, jelikož v tento den zároveň probíhalo koronování 3. sady PE fólie. Z posledních tří měření (C – E) vyplývá, že hodnota volné povrchové energie u vrchní strany klesla pod hodnoty, které byly naměřeny u neupravených fólií. Veškeré hodnoty volných povrchových energií včetně jejich polárních a disperzních složek jsou uvedeny v Příloze 3. Hodnota polární složky PE fólie hned po koronování narostla a hodnota disperzní složky zůstala přibližně stejná.

### Měření 3. sady PE fólie upravené korunou

Měření 3. sady koronované PE fólie bylo provedeno 19. 10. 2022. Jako u předchozího Měření 2. sady PE fólie byla učiněna úprava vzorků v koronovacím zařízení o výkonu 800 W a vzorky byly taktéž upraveny šesti průjezdy koronovací hlavy. V Tabulce 7 jsou uvedeny hodnoty volné povrchové energie koronovaných vzorků PE fólie pro její vrchní a spodní stranu vypočtené pomocí metody OWRK. V Tabulce 7 můžeme pozorovat hodnoty hned po úpravě vzorků PE fólie, následující den po koronování a jako poslední bylo provedeno měření druhý den po koronování.

Tabulka 7: Průměrné hodnoty volné povrchové energie ( $\sigma_s$ ) v čase u 3. sady koronované PE fólie pro vrchní a spodní stranu a její výběrová směrodatná odchylka (s)

Měření	Vrchní strana		Spodní strana	
	$\sigma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	s [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	s [mJ/m <sup>2</sup> ]
A (19. 10. 2022)	35,3	0,9	32,7	0,1
B (20. 10. 2022)	30,4	1,1	29,7	0,8
C (21. 10. 2022)	28,3	1,1	29,3	1,2

Měření A bylo provedeno hned po koronování PE fólie. V případě tohoto měření nám volná povrchová energie sice stoupla vůči neupraveným fóliím, ale ne o tolik jako u Měření 1. sady PE fólie (Tabulka 5) a Měření 2. sady PE fólie (Tabulka 6), kde byl nárůst hodnot pro obě strany vyšší. Můžeme sledovat nárůst hodnoty volné povrchové energie o max. 1 mJ/m<sup>2</sup> pro vrchní stranu PE fólie (záleží na daném měření neupravené PE fólie) a o 6 mJ/m<sup>2</sup> u spodní strany PE fólie. Změny volné povrchové energie nebyly natolik vysoké, což mohlo být zapříčiněno špatným přilepením upravovaných vzorků na koronovací stůl, jelikož při pozdějších měřeních jsme se s takto nízkým nárůstem po koronování již nesetkali. Měření B bylo provedeno po jednom dni od koronování. Hodnoty volné povrchové energie klesly pro vrchní stranu o 4,9 mJ/m<sup>2</sup> a pro spodní stranu o 3 mJ/m<sup>2</sup> oproti měření A. Pokles po jednom dni nebyl tak výrazný jako u předchozích měření, kde bylo další měření prováděno až dva dny od koronování, ale také výchozí hodnoty byly výrazně nižší. Měření C bylo provedeno dva dny od koronování a volná povrchová energie klesla pro vrchní stranu celkově o 7 mJ/m<sup>2</sup> vůči měření A. Pro spodní stranu byl pokles hodnoty volné povrchové energie oproti měření B zanedbatelný a v rámci směrodatné odchylky. Veškeré hodnoty volných povrchových energií včetně jejich polárních a disperzních složek Měření 3. sady PE fólie jsou uvedeny v Příloze 4. Jako v předchozích měřeních upravené PE fólie můžeme hned po koronování pozorovat nárůst polární složky volné povrchové energie. V tomto případě není nárůst tak vysoký, jako u předchozích dvou měření.

Vzhledem k předešlým výsledkům je při následujících měřeních upravených PE fólií výkon koronovacího zařízení již permanentně nastaven na 800 W a koronovací hlava projede nad vzorky vždy šestkrát. Toto nastavení koronovacího stroje zůstává neměnné (pro zachování stejných podmínek) a nebude dále znovu uváděno.

### Měření 4. sady PE fólie upravené korunou

Měření 4. sady koronované PE fólie bylo provedeno 5. 12. 2022. V Tabulce 8 jsou uvedeny hodnoty volné povrchové energie koronované PE fólie pro její vrchní a spodní stranu vypočtené pomocí metody OWRK. Hodnoty v Tabulce 8 jsou uvedeny od prvního měření upravené

PE fólie, a to hned po jejím korunování, pět hodin od korunování, jeden den po korunování, šestnáct dní po korunování a dva měsíce po korunování.

*Tabulka 8: Průměrné hodnoty volné povrchové energie ( $\sigma_s$ ) v čase u 4. sady korunované PE fólie pro vrchní a spodní stranu a její výběrová směrodatná odchylka (s)*

Měření	Vrchní strana		Spodní strana		Poznámka
	$\sigma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	s [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	s [mJ/m <sup>2</sup> ]	
A (5. 12. 2022)	41,8	1,7	43,6	2,5	Ihned po úpravě
B (5. 12. 2022)	33,1	1,4	34,8	1,8	5 hod. po úpravě
C (6. 12. 2022)	31,4	0,8	33,1	0,6	-
D (21. 12. 2022)	30,2	0,8	31,5	0,3	-
E (3. 2. 2023)	30,6	0,9	31,1	1,0	-

Měření A bylo provedeno hned po korunování PE fólie. V případě tohoto měření volná povrchová energie pro vrchní stranu narostla, oproti neupravené PE fólii, o 6 mJ/m<sup>2</sup> a nárůst můžeme také sledovat u spodní strany PE fólie, a to o více jak 16 mJ/m<sup>2</sup>. Měření po pěti hodinách bylo provedeno z toho důvodu, aby se zjistilo, jak moc rychle volná povrchová energie PE fólie klesá, jelikož u Měření 3. sady PE fólie, nám po jednom dni volná povrchová energie klesla výrazně. Pokles volné povrchové energie byl v případě měření B opět výrazný. Pro vrchní stranu byl pokles volné povrchové energie o 8,7 mJ/m<sup>2</sup> a u spodní strany o 8,8 mJ/m<sup>2</sup>. Měření C až E byly provedeny v průběhu třech měsíců, kdy v Tabulce 8 pozorujeme ustálení hodnot volné povrchové energie jak pro vrchní, tak spodní stranu PE fólie. Veškeré hodnoty volných povrchových energií včetně jejich polárních a disperzních složek jsou uvedeny v Příloze 5.

#### **Měření 5. sady PE fólie upravené korunou**

Měření 5. sady korunované PE fólie bylo provedeno 21. 12. 2022. V Tabulce 9 jsou uvedeny hodnoty volné povrchové energie korunované PE fólie pro její vrchní a spodní stranu vypočtené pomocí metody OWRK. V Tabulce 9 jsou uvedeny hodnoty od prvního měření PE fólie, a to hned po jejím korunování, po dvou a pěti hodinách od korunování, jeden den od korunování, po jednom měsíci a jako poslední bylo provedeno měření dva měsíce od korunování.

*Tabulka 9: Průměrné hodnoty volné povrchové energie ( $\sigma_s$ ) v čase u 5. sady korunované PE fólie pro vrchní a spodní stranu a její výběrová směrodatná odchylka (s)*

Měření	Vrchní strana		Spodní strana		Poznámka
	$\sigma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	s [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	s [mJ/m <sup>2</sup> ]	
A (21. 12. 2022)	43,9	1,4	39,6	0,8	Ihned po úpravě
B (21. 12. 2022)	42,0	1,4	36,9	1,3	2 hod. po úpravě
C (21. 12. 2022)	35,7	0,3	36,1	0,6	5 hod. po úpravě
D (22. 12. 2022)	35,0	0,8	33,5	0,6	-
E (19. 1. 2023)	33,8	1,3	33,2	0,7	-
F (24. 2. 2023)	31,2	0,4	30,4	0,5	-

Měření A bylo provedeno ihned po koronování vzorků PE fólie. Volná povrchová energie u vrchní strany vzrostla oproti neupravené fólii o přibližně 10 mJ/m<sup>2</sup> a u spodní strany můžeme pozorovat nárůst o 13 mJ/m<sup>2</sup>. U tohoto měření byl nárůst volné povrchové energie po úpravě korunou u vrchní strany podobný jako u předchozích měření a u spodní strany byl o něco nižší než u Měření 2. sady a 4. sady PE fólie. Měření B bylo provedeno dvě hodiny po koronování. Dřívější měření, než po dvou hodinách od koronování nebylo možné provést, jelikož proměření všech vzorků hned po koronování pro vrchní a spodní stranu zabralo přibližně dvě hodiny. Po dvou hodinách od koronování sledujeme pokles hodnoty volné povrchové energie pouze u spodní strany o 2,7 mJ/m<sup>2</sup>, zatímco u vrchní strany je pokles menší (o 1,9 mJ/m<sup>2</sup>) a rozdíl je v rámci chyby měření. U měření C, které bylo provedeno po pěti hodinách je, již pokles volné povrchové energie u vrchní strany PE fólie výraznější, a to o 8,2 mJ/m<sup>2</sup>. U spodní strany nesledujeme téměř žádnou změnu. Pokles v dalších měřeních po jednom dni, jednom a dvou měsících byl už jen mírný (cca o 4,5 mJ/m<sup>2</sup>). Veškeré hodnoty volných povrchových energií včetně jejich polárních a disperzních složek jsou uvedeny v Příloze 6.

### Měření 6. sady PE fólie upravené korunou

Měření 6. sady koronované PE fólie bylo provedeno 1. 2. 2023. V Tabulce 10 jsou uvedeny hodnoty volné povrchové energie koronované fólie pro její vrchní a spodní stranu vypočtené pomocí metody OWRK. V Tabulce 10 jsou také uvedeny hodnoty od prvního měření PE fólie, a to hned po jejím koronování, po dvou a pěti hodinách od koronování, jeden a dva dny od koronování, po necelém měsíci a dva měsíce od koronování.

*Tabulka 10: Průměrné hodnoty volné povrchové energie ( $\sigma_s$ ) v čase u 6. sady koronované PE fólie pro vrchní a spodní stranu a její výběrová směrodatná odchylka (s)*

Měření	Vrchní strana		Spodní strana		Poznámka
	$\sigma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	s [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	s [mJ/m <sup>2</sup> ]	
A (1. 2. 2023)	45,1	0,4	37,1	1,4	Ihned po úpravě
B (1. 2. 2023)	41,4	0,8	35,3	1,1	2 hod. po úpravě
C (1. 2. 2023)	40,4	0,9	34,6	0,6	5 hod. po úpravě
D (2. 2. 2023)	37,8	0,5	33,2	0,9	-
E (3. 2. 2023)	34,4	0,5	31,8	0,5	-
F (24. 2. 2023)	30,2	0,2	30,8	0,4	-
G (30. 3. 2023)	30,5	0,4	29,1	0,8	-

Měření A bylo provedeno hned po koronování PE fólie. V případě tohoto měření volná povrchová energie pro vrchní stranu vzrostla, oproti neupravené fólii o přibližně 10 mJ/m<sup>2</sup>. Nárůst můžeme sledovat také u spodní strany PE fólie, a to také o 10 mJ/m<sup>2</sup>. U tohoto měření byl nárůst volné povrchové energie po úpravě korunou podobný, jako tomu bylo u Měření 5. sady PE fólie. Měření B bylo provedeno dvě hodiny po koronování a jak již bylo zmíněno výše, dvě hodiny po úpravě volná povrchová energie PE fólie mírně klesá, jako tomu bylo například u Měření 5. sady PE fólie. V ten samý den bylo provedeno ještě měření po pěti hodinách. U měření C sledujeme pokles volné povrchové energie oproti měření A pro vrchní stranu o 4,7 mJ/m<sup>2</sup> a pro spodní stranu o 2,5 mJ/m<sup>2</sup>. Měření D bylo provedeno následující den, kdy opět pozorujeme pokles volné povrchové energie vůči měření A. U vrchní strany se jedná o pokles o 7,3 mJ/m<sup>2</sup> a u spodní strany je pokles téměř už 3,9 mJ/m<sup>2</sup>. U měření E, které proběhlo dva dny od koronování pozorujeme další pokles volné povrchové energie oproti měření A, a to



pro vrchní stranu o  $9,9 \text{ mJ/m}^2$  a pro spodní stranu o  $6,3 \text{ mJ/m}^2$ . Jelikož byla zpozorována již při minulých měřeních skutečnost takto rychlého a prudkého poklesu volné povrchové energie, další měření, měření F, bylo provedeno až za necelý měsíc. U měření F dále pozorujeme snížení volné povrchové energie PE fólie, jak pro vrchní, tak spodní stranu, kdy vrchní strana klesla oproti měření E o  $4 \text{ mJ/m}^2$  a spodní strana pouze o  $1 \text{ mJ/m}^2$ . Poslední měření, měření G, bylo provedeno po dvou měsících od koronování a jednalo se o poslední měření, které mělo potvrdit předešlé výsledky. Volná povrchová energie vrchní a spodní strany se měsíc od měření F téměř nezměnila, zůstává na podobných hodnotách, jako u měření E. Veškeré hodnoty volných povrchových energií včetně jejich polárních a disperzních složek 6. sady koronované PE fólie jsou uvedeny v Příloze 7.

## ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo studium volné povrchové energie u polyetylenové fólie, která se mění v závislosti na čase. Studium změny volné povrchové energie probíhalo jak pro upravenou, tak pro neupravenou PE fólii pomocí měření kontaktních úhlů čtyř kapalin a následného výpočtu pomocí metody OWRK.

Původním záměrem studia změny volné povrchové energie u koronou upravené PE fólie bylo sledování poklesu volné povrchové energie v delším časovém úseku pro jednu sadu koronovaných vzorků PE fólie, které by byly proměřovány v časovém úseku přibližně šesti měsíců. Hned při prvním měření bylo zjištěno, že volná povrchová energie v čase klesá velmi rychle, jelikož byly dva dny po koronování u obou stran PE fólie hodnoty volné povrchové energie blízké hodnotám před koronováním nebo dokonce na hodnotách nižších. Na základě tohoto zjištění se přistoupilo k modifikaci postupu měření a vzorky se proměřovaly v kratších časových úsecích po koronování a měření se několikrát opakovalo. Bylo zjištěno, že po koronování vzorků PE fólie hodnota volné povrchové energie vzroste jak u vrchní, tak u spodní strany, a to na hodnoty u vrchní strany průměrně okolo  $43 \text{ mJ/m}^2$  a u spodní stran o něco nižší ( $40 \text{ mJ/m}^2$ ). Nárůst volné povrchové energie závisí hlavně na zvýšení její polární složky po úpravě, přičemž disperzní složka zůstává přibližně stejná. Dvě hodiny od koronování volná povrchová energie mírně klesá, ale je stále vysoká. Po pěti hodinách od koronování lze pozorovat již výraznější pokles volné povrchové energie, a to přibližně o  $7 \text{ mJ/m}^2$  pro vrchní stranu a  $5 \text{ mJ/m}^2$  pro spodní stranu. Přibližně po měsíci se hodnota volné povrchové energie u vrchní strany vrací na hodnoty, které měla před úpravou. Naopak u spodní strany není pokles tak výrazný a volná povrchová energie zůstává vyšší, než byla u neupravené PE fólie. Z toho vyplývá, že pokud bychom chtěli PE fólii např. potisknout, měli bychom tak učinit do dvou hodin od koronování, abychom dosáhli co nejlepších výsledků a PE fólie byla dobře smáčena tiskovými barvami. Zároveň byla v čase sledována i volná povrchová energie u neupravené PE fólie. Pro její vrchní stranu, která byla již z výroby upravena, byl pozorován pokles volné povrchové energie v čase až na hodnoty blízké se neupravené spodní straně PE fólie. Hodnoty volné povrchové energie u spodní strany se neměnily a byly podobné v průběhu celého měření.

Z pohledu dalších měření by bylo zajímavé proměřit i chování dalších polymerních materiálů, které se při tisku často používají (např. polypropylen a polyethylentereftalát), zda i tyto materiály budou vykazovat takto rychlý pokles volné povrchové energie po úpravě koronou. U koronového zařízení by bylo vhodné mít vzorky ke stolu přichycené pomocí podtlaku, a ne lepicích pásek, což by zajistilo větší stabilitu a homogenitu úpravy vzorků pomocí koronovacího zařízení.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] KAPLANOVÁ, M. *Moderní polygrafie*. 1. vydání. Praha: Svaz polygrafických podnikatelů, 2010. ISBN 978-80-254-4230-2.
- [2] KUDRLE, V. Volná povrchová energie. *Informační systém Masarykovy univerzity* [online]. 2009 [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/el/sci/jaro2015/F8542/um/Volna\\_povrchova\\_energie\\_modely\\_ucebni\\_material.pdf?lang=en](https://is.muni.cz/el/sci/jaro2015/F8542/um/Volna_povrchova_energie_modely_ucebni_material.pdf?lang=en)
- [3] KASÁLKOVÁ, N. Měření smáčivosti plazmaticky modifikovaných polymerů jako substrátů pro výrobu léčiv. Návod pro laboratoře. *Ústav inženýrství pevných látek – VŠCHT Praha* [online]. [cit. 2023-03-05]. Dostupné z: [https://ipl.vscht.cz/files/uzel/0024345/Kasalkova\\_VL2.pdf?redirected](https://ipl.vscht.cz/files/uzel/0024345/Kasalkova_VL2.pdf?redirected)
- [4] Povrchové napětí. *Věda nás baví* [online]. [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: [https://www.vedanasbavi.cz/orisek-5-zs-vnb-i-05-povrchove-napeti?ID\\_mesta=3&IDp=1&fbclid=IwAR2TNjyx2EergfD9H34bWXS\\_DWfRFqc5gTkkCHRTkE fz\\_9WScJsnvX30-mw](https://www.vedanasbavi.cz/orisek-5-zs-vnb-i-05-povrchove-napeti?ID_mesta=3&IDp=1&fbclid=IwAR2TNjyx2EergfD9H34bWXS_DWfRFqc5gTkkCHRTkE fz_9WScJsnvX30-mw)
- [5] Surface tension values of some common test liquids for surface energy analysis. *Surface-tension* [online]. 2017 [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: <http://www.surface-tension.de/>
- [6] Vodní kapky na různých površích. *Sbírka fyzikálních pokusů* [online]. 2021 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <http://fyzikalnipokusy.cz/2337/vodni-kapky-na-ruznych-povrsich>
- [7] KRÁSNÝ, I. *Měření kontaktních úhlů smáčení a určování povrchové energie plastů* [online]. 2010, Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati. [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: [https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/14169/kr%C3%A1sn%C3%BD\\_2010\\_dp.pdf?sequence=1](https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/14169/kr%C3%A1sn%C3%BD_2010_dp.pdf?sequence=1). Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická.
- [8] Contact Angle Measurement. *Biolin Scientific* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://www.biolinscientific.com/measurements/contact-angle>
- [9] DOMINCZUK, J., KRAWCZUK, A. Comparison of Surface Free Energy Calculation Methods. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2015, vol. 791, s. 259–265. [cit. 2023-04-02] Dostupné z: <https://www.proquest.com/docview/1709476110?accountid=17239>
- [10] SPOONER, E. What is Surface Energy? Formula & Definition. *Ossila* [online]. [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://www.ossila.com/en-eu/pages/a-guide-to-surface-energy#fowkes-model>
- [11] Fowkes method. *KRÜSS Scientific* [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.kruss-scientific.com/en/know-how/glossary/fowkes-method>
- [12] Owens, Wendt, Rabel and Kaelble (OWRK) method. *KRÜSS Scientific* [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.kruss-scientific.com/en/know-how/glossary/owens-wendt-rabel-and-kaelble-owrk-method>

- [13] ŻENKIEWICZ, M. Methods for the calculation of surface free energy of solids. *Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineerig* [online]. 2007, vol. 24, iss. 1, s. 137–145 [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/profile/Marian-Zenkiewicz/publication/40804787\\_Methods\\_for\\_the\\_calculation\\_of\\_surface\\_free\\_ene\\_rgy\\_of\\_solids/links/02e7e5224628190bef000000/Methods-for-the-calculation-of-surface-free-energy-of-solids.pdf?origin=publication\\_detail](https://www.researchgate.net/profile/Marian-Zenkiewicz/publication/40804787_Methods_for_the_calculation_of_surface_free_ene_rgy_of_solids/links/02e7e5224628190bef000000/Methods-for-the-calculation-of-surface-free-energy-of-solids.pdf?origin=publication_detail)
- [14] Method according to Wu. *KRÜSS Scientific* [online]. [cit. 2023-04-18]. Dostupné z: <https://www.kruss-scientific.com/en/know-how/glossary/method-according-to-wu>
- [15] Oss and Good method. *KRÜSS Scientific* [online]. [cit. 2023-04-18]. Dostupné z: <https://www.kruss-scientific.com/en/know-how/glossary/oss-and-good-method>
- [16] Surface Free Energy. *NanoScience Instruments* [online]. c2023 [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://www.nanoscience.com/techniques/tensiometry/surface-free-energy/>
- [17] Method according to Zisman. *KRÜSS Scientific* [online]. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.kruss-scientific.com/en/know-how/glossary/method-according-to-zisman>
- [18] Arcotest – Fixy a inkousty. *Proinex Instruments* [online]. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.proinex.cz/p/arcotest-fixy-a-inkousty>
- [19] What is surface treatment?. *Tantec* [online]. [cit. 2023-04-28]. Dostupné z: <https://tantec.com/what-is-surface-treatment/>
- [20] What’s corona discharge?. *Photonis* [online]. 2022 [cit. 2023-04-28]. Dostupné z: <https://www.photonis.com/news/whats-corona-discharge?fbclid=IwAR04k6FGiIO-RnqcCLy9PxjVrpytX2ci99RD9bUbZA6RFIqPDNTi4QrOWrg>
- [21] IZDEBSKA, J., THOMAS, S. Printing on Polymers Fundamentals and Applications. [online] 2016, s. 123–142. ISBN 978-0-323-37468-2 [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=IjROBQAAQBAJ&pg=PA21&lpg=PA21&dq=Polymeric+MaterialsdStructure,+Properties,+and+Applications+C.V.+Pious+and+Sabu+Thomas+International+and+Interuniversity+Center+for+Nanoscience+and+Nanotechnology,+Mahatma+Gandhi+University,+Kottayam,+India&source=bl&ots=DZycnRLe5i&sig=ACfU3U3CL387Q7y6GX7rmoqvGfIU76vrg&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwikkpSKldnxAhUiNOwKHSNGDVEQ6AEwAHoECAMQAw#v=onepage&q&f=false>
- [22] Plasma Treatment Explained in Simple Terms. *Henniker plasma* [online]. [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: [https://plasmatrement.co.uk/pt/plasma-technology-overview/plasma-treatment-explained?fbclid=IwAR3GP5vn\\_fMDY1vr1n1FuhrzjLjgQTjPOUbhYiQiQayqUeuoX3cutU7TCTc](https://plasmatrement.co.uk/pt/plasma-technology-overview/plasma-treatment-explained?fbclid=IwAR3GP5vn_fMDY1vr1n1FuhrzjLjgQTjPOUbhYiQiQayqUeuoX3cutU7TCTc)
- [23] Plasma Treatment. *Vetaphone* [online]. [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://www.vetaphone.com/our-offering/plasma-treatment/>

- [24] Surface Treatment Processes: Flame Treatment. *Brighton Science* [online]. 2017 [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://www.brighton-science.com/blog/materials-science/surface-treatment-processes-flame-treatment?fbclid=IwAR3Mx7kH5VXb12NgD93MgI3z43kK2cIDTFj6APOMiywLFbW7raQ7HUHCx8>
- [25] ROTHON, R., JOHANSSON, K. S. *Applied Plastics Engineering Handbook: Surface Modification of Plastics* [online]. 2017, s. 443–487. ISBN 978-0-323-39040-8 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://app.knovel.com/kn/resources/kpAPEHPMA5/toc>
- [26] DE OLIVEIRA, M. F. Adhesion mechanisms for automotive plastic parts. *ResearchGate* [online]. 2009 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Flame-treatment-showing-the-interaction-between-the-chemical-groups-from-the-polymer\\_fig1\\_280732297](https://www.researchgate.net/figure/Flame-treatment-showing-the-interaction-between-the-chemical-groups-from-the-polymer_fig1_280732297)
- [27] Metoda fluorace. *Lontech* [online]. [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://www.lontech.cz/metoda-fluorace.html?mobile=0&lang=1>
- [28] Fluorace předúprava povrchů plastových materiálů v průmyslových aplikacích. *Technický týdeník* [online]. 2006 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/fluorace-preduprava-povrchu-plastovych-materialu-v-prumyslovych-aplikacich\\_10824.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/fluorace-preduprava-povrchu-plastovych-materialu-v-prumyslovych-aplikacich_10824.html)
- [29] MINCHEVA, R., RAQUEZ, J.M. *The Surface of Polymers*. [online]. 2020 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: [https://application.wiley-vch.de/books/sample/3527345418\\_c01.pdf](https://application.wiley-vch.de/books/sample/3527345418_c01.pdf)
- [30] LINDNER, M., RODLER, N., JESDINSZKI, M., SCHMID, M., SÄNGERLAUB, S. Surface energy of corona treated PP, PE and PET films, its alteration as function of storage time and the effect of various corona dosages on their bond strength after lamination. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 2017, vol. 135, iss. 11 [cit. 2023-05-08]. 0021–8995. DOI: 10.1002/app.45842
- [31] HOSCH, W. L., LOTH, G. Polyethylene (PE). *Britannica* [online]. 2009 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/polyethylene>
- [32] Syntetické polymery. *Elektronická učebnice - ELUC* [online]. 2009 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/2537>
- [33] KOERNER, G. R., KOERNER, R. M., HSUAN, Y. G. Geosynthetics in Civil Engineering: Surface Modification of Plastics [online]. 2007, s. 36–65 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9781855736078500035>
- [34] Everything You Need To Know About Polypropylene (PP) Plastic. *Creative Mechanisms* [online]. 2016 [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.creativemechanisms.com/blog/all-about-polypropylene-pp-plastic>
- [35] Polyethylene Terephthalate: Uses, Advantages, and Disadvantages. *Xometry* [online]. 2022 [cit. 2023-06-22]. Dostupné z: <https://www.xometry.com/resources/materials/polyethylene-terephthalate/>

- [36] Obalové fólie. *Granitol a. s.* [online]. [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://www.granitol.cz/doc/cz/6-obalove-folie-2020.pdf>
- [37] Vlastnosti a použití etylenglykolu. *Skupina PCC* [online]. 2022 [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://www.products.pcc.eu/cs/blog/vlastnosti-a-pouziti-etylenglykolu/>
- [38] BEZPEČNOSTNÍ LIST: Ethylenglykol. *Sigma Aldrich* [online]. 2023 [cit. 2023-06-05]. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/CZ/cs/sds/sial/324558>
- [39] BEZPEČNOSTNÍ LIST: Formamide. *Sigma Aldrich* [online]. 2023 [cit. 2023-06-05]. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/CZ/cs/sds/sigma/f9037>
- [40] BEZPEČNOSTNÍ LIST: Diiodomethane. *Sigma Aldrich* [online]. 2023 [cit. 2023-0-05]. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/CZ/cs/sds/sial/158429>
- [41] Testovací inkousty, Testovací fixy a Příslušenství. *Arcotest* [online]. [cit. 2023-06-05]. Dostupné z: <https://arcotest.info/cs/testovaci-fixy/#blau>
- [42] OCA – Optical contact angle measuring and contour analysis systems. *DataPhysics Instruments* [online]. [cit. 2023-06-11]. Dostupné z: [https://www.dataphysics-instruments.com/products/oca/?gclid=CjwKCAjw-IWkBhBTEiwA2exyO\\_NEO1hXMhOEoMeLp4E40u\\_IsDWrEyqvgbT0pmIaJBR1cv-sZJknGxoCGWUQAvD\\_BwE#!](https://www.dataphysics-instruments.com/products/oca/?gclid=CjwKCAjw-IWkBhBTEiwA2exyO_NEO1hXMhOEoMeLp4E40u_IsDWrEyqvgbT0pmIaJBR1cv-sZJknGxoCGWUQAvD_BwE#!)

## PŘÍLOHY

<b>Příloha 1:</b> Volná povrchová energie ( $\sigma_s$ ) neupravených PE fólií včetně jejich polárních ( $\sigma_s^P$ ) a disperzních ( $\sigma_s^D$ ) složek a výběrových směrodatných odchylek ( $s$ ).....	48
<b>Příloha 2:</b> Volná povrchová energie ( $\sigma_s$ ) 1. sady koronované PE fólie včetně její polární ( $\sigma_s^P$ ) a disperzní ( $\sigma_s^D$ ) složky a výběrových směrodatných odchylek ( $s$ ).....	49
<b>Příloha 3:</b> Volná povrchová energie ( $\sigma_s$ ) 2. sady koronované PE fólie včetně její polární ( $\sigma_s^P$ ) a disperzní ( $\sigma_s^D$ ) složky a výběrových směrodatných odchylek ( $s$ ).....	50
<b>Příloha 4:</b> Volná povrchová energie ( $\sigma_s$ ) 3. sady koronované PE fólie včetně její polární ( $\sigma_s^P$ ) a disperzní ( $\sigma_s^D$ ) složky a výběrových směrodatných odchylek ( $s$ ).....	51
<b>Příloha 5:</b> Volná povrchová energie ( $\sigma_s$ ) 4. sady koronované PE fólie včetně její polární ( $\sigma_s^P$ ) a disperzní ( $\sigma_s^D$ ) složky a výběrových směrodatných odchylek ( $s$ ).....	52
<b>Příloha 6:</b> Volná povrchová energie ( $\sigma_s$ ) 5. sady koronované PE fólie včetně její polární ( $\sigma_s^P$ ) a disperzní ( $\sigma_s^D$ ) složky a výběrových směrodatných odchylek ( $s$ ).....	53
<b>Příloha 7:</b> Volná povrchová energie ( $\sigma_s$ ) 6. sady koronované PE fólie včetně její polární ( $\sigma_s^P$ ) a disperzní ( $\sigma_s^D$ ) složky a výběrových směrodatných odchylek ( $s$ ).....	54

**Příloha 1:** Volná povrchová energie ( $\sigma_s$ ) neupravených PE fólií včetně jejich polárních ( $\sigma_s^P$ ) a disperzních ( $\sigma_s^D$ ) složek a výběrových směrodatných odchylek ( $s$ ).

Měření	Vrchní strana			Spodní strana		
	$\sigma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]
1 (14. 12. 2021)	9,2	27,4	36,6	4,3	26,0	30,3
2 (14. 12. 2021)	6,3	27,1	33,4	5,8	24,4	30,2
<b>Průměr</b>	<b>7,7</b>	<b>27,3</b>	<b>35,0</b>	<b>5,0</b>	<b>25,2</b>	<b>30,2</b>
<b>s</b>	<b>2,1</b>	<b>0,2</b>	<b>2,3</b>	<b>1,1</b>	<b>1,1</b>	<b>0,1</b>
1 (3. 2. 2022)	9,7	26,3	36,0	4,2	22,2	26,3
2 (3. 2. 2022)	14,8	22,2	37,0	3,9	22,8	26,7
3 (3. 2. 2022)	8,2	26,9	35,1	2,1	25,0	27,1
3 (3. 2. 2022)	9,1	25,7	34,8	2,5	23,2	25,7
<b>Průměr</b>	<b>10,5</b>	<b>25,3</b>	<b>35,7</b>	<b>3,2</b>	<b>23,3</b>	<b>26,5</b>
<b>s</b>	<b>0,6</b>	<b>0,9</b>	<b>1,0</b>	<b>0,3</b>	<b>1,2</b>	<b>0,6</b>
1 (6. 4. 2022)	10,5	23,9	34,4	3,0	22,7	25,7
2 (6. 4. 2022)	5,7	26,5	32,2	2,8	23,3	26,1
3 (6. 4. 2022)	8,2	26,5	34,7	2,8	24,4	27,2
<b>Průměr</b>	<b>8,1</b>	<b>25,6</b>	<b>33,8</b>	<b>2,9</b>	<b>23,5</b>	<b>26,3</b>
<b>s</b>	<b>2,4</b>	<b>1,5</b>	<b>1,4</b>	<b>0,1</b>	<b>0,9</b>	<b>0,8</b>
1 (19. 10. 2022)	5,3	26,0	31,3	3,2	22,8	26,0
2 (19. 10. 2022)	13,0	22,1	35,1	3,2	23,1	26,3
3 (19. 10. 2022)	6,1	27,5	33,6	3,3	23,4	26,7
4 (19. 10. 2022)	3,7	28,9	32,6	3,7	22,3	25,9
<b>Průměr</b>	<b>7,1</b>	<b>26,1</b>	<b>33,2</b>	<b>3,3</b>	<b>22,9</b>	<b>26,2</b>
<b>s</b>	<b>4,1</b>	<b>2,9</b>	<b>1,6</b>	<b>0,2</b>	<b>0,5</b>	<b>0,4</b>
1 (1. 2. 2023)	3,5	30,3	33,9	2,8	22,2	25,0
2 (1. 2. 2023)	3,0	26,8	29,8	1,5	26,4	27,9
3 (1. 2. 2023)	3,6	26,1	29,7	1,7	26,3	28,0
4 (1. 2. 2023)	3,2	27,5	30,7	2,1	25,1	27,2
<b>Průměr</b>	<b>3,3</b>	<b>27,7</b>	<b>31,0</b>	<b>2,0</b>	<b>25,0</b>	<b>27,0</b>
<b>s</b>	<b>0,2</b>	<b>1,6</b>	<b>2,0</b>	<b>0,5</b>	<b>1,7</b>	<b>1,4</b>
1 (30. 3. 2023)	2,2	27,5	29,7	2,2	25,5	27,7
2 (30. 3. 2023)	2,3	27,0	29,3	2,0	25,8	27,8
3 (30. 3. 2023)	2,1	27,0	29,1	2,3	25,3	27,6
4 (30. 3. 2023)	2,0	27,6	29,6	1,9	26,2	28,2
<b>Průměr</b>	<b>2,2</b>	<b>27,3</b>	<b>29,4</b>	<b>2,1</b>	<b>25,7</b>	<b>27,8</b>
<b>s</b>	<b>0,1</b>	<b>0,3</b>	<b>0,3</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,2</b>



**Příloha 2:** Volná povrchová energie ( $\sigma_s$ ) 1. sady koronované PE fólie včetně její polární ( $\sigma_s^P$ ) a disperzní ( $\sigma_s^D$ ) složky a výběrových směrodatných odchylek ( $s$ ).

Měření	Vrchní strana			Spodní strana		
	$\sigma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]
1 (2. 5. 2022)	17,7	25,7	43,5	11,4	23,8	35,3
2 (2. 5. 2022)	15,7	27,3	43,0	14,9	23,3	38,1
3 (2. 5. 2022)	11,8	28,1	40,0	8,2	28,0	36,2
<b>Průměr (A)</b>	<b>15,1</b>	<b>27,1</b>	<b>42,1</b>	<b>11,5</b>	<b>25,0</b>	<b>36,5</b>
<b>s</b>	<b>3,0</b>	<b>1,2</b>	<b>1,9</b>	<b>3,4</b>	<b>2,6</b>	<b>1,5</b>
1 (4. 5. 2022)	7,1	24,4	31,5	5,6	26,3	31,9
2 (4. 5. 2022)	6,5	23,6	30,1	3,4	25,4	28,8
3 (4. 5. 2022)	7,7	24,8	32,5	3,2	26,8	30,0
3 (4. 5. 2022)	8,0	23,9	31,9	4,0	26,3	30,3
<b>Průměr (B)</b>	<b>7,3</b>	<b>24,2</b>	<b>31,5</b>	<b>4,1</b>	<b>26,2</b>	<b>30,3</b>
<b>s</b>	<b>0,8</b>	<b>0,7</b>	<b>1,0</b>	<b>0,4</b>	<b>0,7</b>	<b>1,3</b>
1 (11. 5. 2022)	4,5	27,1	31,6	3,0	26,2	29,2
2 (11. 5. 2022)	6,3	24,5	30,8	2,6	26,2	28,8
3 (11. 5. 2022)	5,1	24,9	29,97	2,5	26,6	29,0
4 (11. 5. 2022)	5,1	27,7	32,77	2,8	28,2	31,0
5 (11. 5. 2022)	10,8	22,2	33,00	3,0	28,3	31,3
<b>Průměr (C)</b>	<b>6,3</b>	<b>25,3</b>	<b>31,6</b>	<b>2,8</b>	<b>27,1</b>	<b>29,9</b>
<b>s</b>	<b>3,3</b>	<b>2,8</b>	<b>1,5</b>	<b>0,3</b>	<b>1,0</b>	<b>1,3</b>
1 (7. 6. 2022)	6,8	23,8	30,6	2,8	27,1	29,9
2 (7. 6. 2022)	5,8	23,7	29,5	2,2	27,2	29,4
3 (7. 6. 2022)	6,2	23,4	29,6	2,8	27,1	29,9
4 (7. 6. 2022)	5,7	25,6	31,3	2,9	27,2	30,1
<b>Průměr (D)</b>	<b>6,1</b>	<b>24,1</b>	<b>30,3</b>	<b>2,7</b>	<b>27,1</b>	<b>29,8</b>
<b>s</b>	<b>0,3</b>	<b>1,2</b>	<b>0,8</b>	<b>0,4</b>	<b>0,1</b>	<b>0,3</b>
1 (6. 10. 2022)	10,3	19,3	29,6	4,8	25,3	30,0
2 (6. 10. 2022)	13,5	20,9	34,4	5,3	24,4	29,7
3 (6. 10. 2022)	4,5	28,2	32,7	7,8	21,4	29,2
4 (6. 10. 2022)	13,4	20,7	34,1	12,6	18,5	31,1
<b>Průměr (E)</b>	<b>10,4</b>	<b>22,3</b>	<b>32,7</b>	<b>7,6</b>	<b>22,4</b>	<b>30,0</b>
<b>s</b>	<b>5,2</b>	<b>4,3</b>	<b>2,2</b>	<b>3,7</b>	<b>3,0</b>	<b>0,8</b>

**Příloha 3:** Volná povrchová energie ( $\sigma_s$ ) 2. sady koronované PE fólie včetně její polární ( $\sigma_s^P$ ) a disperzní ( $\sigma_s^D$ ) složky a výběrových směrodatných odchylek ( $s$ ).

Měření	Vrchní strana			Spodní strana		
	$\sigma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]
1 (18. 5. 2022)	17,3	26,4	43,7	12,4	29,3	41,6
2 (18. 5. 2022)	19,8	25,0	44,8	10,9	30,3	41,2
3 (18. 5. 2022)	17,1	25,7	42,8	9,5	31,4	40,9
4 (18. 5. 2022)	14,7	26,8	41,4	12,8	29,9	42,7
<b>Průměr (A)</b>	<b>17,2</b>	<b>26,0</b>	<b>43,2</b>	<b>11,4</b>	<b>30,2</b>	<b>41,6</b>
<b>s</b>	<b>2,1</b>	<b>0,8</b>	<b>1,4</b>	<b>1,5</b>	<b>0,9</b>	<b>0,8</b>
1 (20. 5. 2022)	8,7	24,4	33,0	8,2	26,3	34,5
2 (20. 5. 2022)	5,6	26,1	31,7	10,5	25,3	35,8
3 (20. 5. 2022)	6,9	24,8	31,8	8,5	26,6	35,0
3 (20. 5. 2022)	6,7	24,2	30,8	7,1	25,3	32,4
<b>Průměr (B)</b>	<b>7,0</b>	<b>24,9</b>	<b>31,8</b>	<b>8,6</b>	<b>25,9</b>	<b>34,4</b>
<b>s</b>	<b>1,3</b>	<b>0,8</b>	<b>0,9</b>	<b>1,4</b>	<b>0,7</b>	<b>1,4</b>
1 (26. 5. 2022)	5,3	26,3	31,6	6,2	24,0	30,3
2 (26. 5. 2022)	5,3	25,1	30,3	5,9	25,5	31,4
3 (26. 5. 2022)	6,1	26,4	32,5	7,7	23,8	31,5
4 (26. 5. 2022)	5,4	24,6	30,0	3,1	26,0	29,1
<b>Průměr (C)</b>	<b>5,5</b>	<b>25,6</b>	<b>31,1</b>	<b>5,7</b>	<b>24,8</b>	<b>30,6</b>
<b>s</b>	<b>0,4</b>	<b>0,9</b>	<b>1,1</b>	<b>1,9</b>	<b>1,1</b>	<b>1,1</b>
1 (24. 8. 2022)	4,2	24,1	28,3	3,8	25,4	29,2
2 (24. 8. 2022)	4,8	24,3	29,1	2,0	26,3	28,3
3 (24. 8. 2022)	2,8	24,8	27,6	3,7	25,7	29,3
4 (24. 8. 2022)	4,7	23,3	28,0	2,0	25,9	27,9
<b>Průměr (D)</b>	<b>4,1</b>	<b>24,1</b>	<b>28,2</b>	<b>2,9</b>	<b>25,8</b>	<b>28,7</b>
<b>s</b>	<b>0,9</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	<b>1,0</b>	<b>0,4</b>	<b>0,7</b>
1 (6. 10. 2022)	4,5	26,0	30,5	2,1	25,4	27,5
2 (6. 10. 2022)	4,2	25,0	29,2	2,8	24,4	27,2
3 (6. 10. 2022)	2,1	27,1	29,2	2,8	26,3	29,0
<b>Průměr (E)</b>	<b>3,6</b>	<b>26,0</b>	<b>29,6</b>	<b>2,6</b>	<b>25,3</b>	<b>27,9</b>
<b>s</b>	<b>1,3</b>	<b>1,1</b>	<b>0,7</b>	<b>0,4</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>

**Příloha 4:** Volná povrchová energie ( $\sigma_s$ ) 3. sady koronované PE fólie včetně její polární ( $\sigma_s^P$ ) a disperzní ( $\sigma_s^D$ ) složky a výběrových směrodatných odchylek ( $s$ ).

Měření	Vrchní strana			Spodní strana		
	$\sigma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]
1 (19. 10. 2022)	8,2	25,9	34,0	7,4	25,1	32,6
2 (19. 10. 2022)	10,6	25,2	35,8	11,6	21,0	32,6
3 (19. 10. 2022)	10,5	25,0	35,5	5,2	27,5	32,7
4 (19. 10. 2022)	10,0	26,1	36,1	9,1	23,7	32,8
<b>Průměr (A)</b>	<b>9,8</b>	<b>25,5</b>	<b>35,3</b>	<b>8,3</b>	<b>24,3</b>	<b>32,7</b>
<b>s</b>	<b>1,1</b>	<b>0,5</b>	<b>0,9</b>	<b>2,7</b>	<b>2,7</b>	<b>0,1</b>
1 (20. 10. 2022)	2,1	27,1	29,2	2,8	26,3	29,0
2 (20. 10. 2022)	4,7	25,0	29,7	6,3	24,4	30,6
3 (20. 10. 2022)	6,5	25,0	31,5	5,5	24,5	30,0
4 (20. 10. 2022)	7,2	24,0	31,2	6,6	22,5	29,1
<b>Průměr (B)</b>	<b>5,1</b>	<b>25,3</b>	<b>30,4</b>	<b>5,3</b>	<b>24,4</b>	<b>29,7</b>
<b>s</b>	<b>2,3</b>	<b>1,3</b>	<b>1,1</b>	<b>1,7</b>	<b>1,5</b>	<b>0,8</b>
1 (21. 10. 2022)	1,8	25,7	27,5	2,3	26,7	28,9
2 (21. 10. 2022)	1,8	28,1	29,9	2,3	26,7	28,9
3 (21. 10. 2022)	2,1	25,7	27,7	2,1	26,1	28,3
4 (21. 10. 2022)	2,2	25,8	28,0	3,0	27,9	30,9
<b>Průměr (C)</b>	<b>1,9</b>	<b>26,3</b>	<b>28,3</b>	<b>2,4</b>	<b>26,8</b>	<b>29,3</b>
<b>s</b>	<b>0,2</b>	<b>1,2</b>	<b>1,1</b>	<b>0,4</b>	<b>0,8</b>	<b>1,2</b>

**Příloha 5:** Volná povrchová energie ( $\sigma_s$ ) 4. sady koronované PE fólie včetně její polární ( $\sigma_s^P$ ) a disperzní ( $\sigma_s^D$ ) složky a výběrových směrodatných odchylek ( $s$ ).

Měření	Vrchní strana			Spodní strana		
	$\sigma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]
1 (5. 12. 2022)	8,7	31,4	40,1	16,7	28,9	45,7
2 (5. 12. 2022)	18,0	25,5	43,5	10,5	33,7	44,2
3 (5. 12. 2022)	11,8	30,0	41,7	16,0	24,8	40,8
<b>Průměr (A)</b>	<b>12,8</b>	<b>28,9</b>	<b>41,8</b>	<b>14,4</b>	<b>29,1</b>	<b>43,6</b>
<b>s</b>	<b>4,7</b>	<b>3,1</b>	<b>1,7</b>	<b>3,4</b>	<b>4,5</b>	<b>2,5</b>
1 (5. 12. 2022)	4,7	26,5	31,1	7,4	27,8	35,2
2 (5. 12. 2022)	5,7	28,0	33,7	6,8	28,5	35,3
3 (5. 12. 2022)	6,7	27,6	34,3	4,7	31,7	36,4
4 (5. 12. 2022)	6,8	26,5	33,3	5,9	26,3	32,2
<b>Průměr (B)</b>	<b>6,0</b>	<b>27,1</b>	<b>33,1</b>	<b>6,2</b>	<b>28,6</b>	<b>34,8</b>
<b>s</b>	<b>1,0</b>	<b>0,8</b>	<b>1,4</b>	<b>1,2</b>	<b>2,3</b>	<b>1,8</b>
1 (6. 12. 2022)	3,8	28,2	32,0	7,7	24,7	32,4
2 (6. 12. 2022)	5,4	26,3	31,7	6,6	27,0	33,5
3 (6. 12. 2022)	3,6	26,6	30,2	6,1	27,5	33,6
4 (6. 12. 2022)	5,4	26,5	31,9	7,0	25,6	32,6
<b>Průměr (C)</b>	<b>4,6</b>	<b>26,9</b>	<b>31,4</b>	<b>6,8</b>	<b>26,2</b>	<b>33,1</b>
<b>s</b>	<b>1,0</b>	<b>0,9</b>	<b>0,8</b>	<b>0,7</b>	<b>1,3</b>	<b>0,6</b>
1 (21. 12. 2022)	3,0	26,5	29,5	4,1	27,1	31,2
2 (21. 12. 2022)	2,7	28,6	31,3	3,3	28,1	31,4
3 (21. 12. 2022)	3,7	26,1	29,8	5,4	26,5	31,9
4 (21. 12. 2022)	2,8	27,3	30,1	6,8	24,8	31,6
<b>Průměr (D)</b>	<b>3,0</b>	<b>27,1</b>	<b>30,2</b>	<b>4,9</b>	<b>26,6</b>	<b>31,5</b>
<b>s</b>	<b>0,5</b>	<b>1,1</b>	<b>0,8</b>	<b>1,5</b>	<b>1,4</b>	<b>0,3</b>
1 (3. 2. 2023)	0,8	28,8	29,6	1,7	28,1	29,8
2 (3. 2. 2023)	1,2	30,4	31,6	1,6	29,4	31,0
3 (3. 2. 2023)	1,5	28,9	30,4	1,8	30,4	32,2
4 (3. 2. 2023)	1,6	29,4	31,0	3,1	28,2	31,3
<b>Průměr (E)</b>	<b>1,3</b>	<b>29,4</b>	<b>30,6</b>	<b>2,1</b>	<b>29,0</b>	<b>31,1</b>
<b>s</b>	<b>0,4</b>	<b>0,7</b>	<b>0,9</b>	<b>0,7</b>	<b>1,1</b>	<b>1,0</b>

**Příloha 6:** Volná povrchová energie ( $\sigma_s$ ) 5. sady koronované PE fólie včetně její polární ( $\sigma_s^P$ ) a disperzní ( $\sigma_s^D$ ) složky a výběrových směrodatných odchylek ( $s$ ).

Měření	Vrchní strana			Spodní strana		
	$\sigma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]
1 (21. 12. 2022)	17,6	27,7	45,2	15,7	24,5	40,2
2 (21. 12. 2022)	16,7	25,4	42,2	16,0	23,5	39,5
3 (21. 12. 2022)	17,7	25,9	43,6	13,1	27,0	40,1
4 (21. 12. 2022)	17,4	27,4	44,8	7,7	30,8	38,5
<b>Průměr (A)</b>	<b>17,3</b>	<b>26,6</b>	<b>43,9</b>	<b>13,1</b>	<b>26,5</b>	<b>39,6</b>
<b>s</b>	<b>0,4</b>	<b>0,9</b>	<b>1,4</b>	<b>3,8</b>	<b>3,2</b>	<b>0,8</b>
1 (21. 12. 2022)	17,6	26,3	43,9	10,6	27,2	37,8
2 (21. 12. 2022)	17,0	25,1	42,1	6,5	31,2	37,7
3 (21. 12. 2022)	17,7	23,3	41,0	6,8	30,1	36,8
4 (21. 12. 2022)	16,4	24,7	41,0	5,7	29,4	35,1
<b>Průměr (B)</b>	<b>17,2</b>	<b>24,8</b>	<b>42,0</b>	<b>7,4</b>	<b>29,5</b>	<b>36,9</b>
<b>s</b>	<b>0,6</b>	<b>1,3</b>	<b>1,4</b>	<b>2,2</b>	<b>1,7</b>	<b>1,3</b>
1 (21. 12. 2022)	7,5	27,8	35,3	10,7	25,7	36,4
2 (21. 12. 2022)	7,4	28,3	35,7	9,0	27,7	36,7
3 (21. 12. 2022)	11,0	25,0	36,0	9,5	26,3	35,8
4 (21. 12. 2022)	8,7	26,8	35,6	8,5	26,9	35,3
<b>Průměr (C)</b>	<b>8,7</b>	<b>27,0</b>	<b>35,7</b>	<b>9,4</b>	<b>26,6</b>	<b>36,1</b>
<b>s</b>	<b>1,7</b>	<b>1,5</b>	<b>0,3</b>	<b>1,0</b>	<b>0,8</b>	<b>0,6</b>
1 (22. 12. 2022)	5,7	28,0	33,8	5,2	27,8	32,9
2 (22. 12. 2022)	10,1	25,6	35,7	6,1	26,9	32,9
3 (22. 12. 2022)	7,9	27,4	35,3	8,7	25,0	33,7
4 (22. 12. 2022)	11,0	24,3	35,3	9,1	25,1	34,2
<b>Průměr (D)</b>	<b>8,7</b>	<b>26,3</b>	<b>35,0</b>	<b>7,2</b>	<b>26,2</b>	<b>33,5</b>
<b>s</b>	<b>2,4</b>	<b>1,7</b>	<b>0,8</b>	<b>1,9</b>	<b>1,3</b>	<b>0,6</b>
1 (19. 1. 2023)	3,0	29,2	32,2	1,4	32,6	34,0
2 (19. 1. 2023)	5,5	27,9	33,4	2,1	30,2	32,3
3 (19. 1. 2023)	6,0	28,6	34,6	2,9	30,4	33,3
4 (19. 1. 2023)	7,0	28,0	35,1	3,6	29,6	33,2
<b>Průměr (E)</b>	<b>5,4</b>	<b>28,4</b>	<b>33,8</b>	<b>2,5</b>	<b>30,7</b>	<b>33,2</b>
<b>s</b>	<b>1,7</b>	<b>0,6</b>	<b>1,3</b>	<b>1,0</b>	<b>1,3</b>	<b>0,7</b>
1 (24. 2. 2023)	1,9	29,5	31,5	1,4	29,8	31,2
2 (24. 2. 2023)	2,1	28,8	31,0	1,7	28,4	30,1
3 (24. 2. 2023)	1,5	29,4	30,8	2,0	28,3	30,3
4 (24. 2. 2023)	1,8	29,9	31,7	2,9	27,1	30,0
<b>Průměr (F)</b>	<b>1,8</b>	<b>29,4</b>	<b>31,2</b>	<b>2,0</b>	<b>28,4</b>	<b>30,4</b>
<b>s</b>	<b>0,3</b>	<b>0,5</b>	<b>0,4</b>	<b>0,7</b>	<b>1,1</b>	<b>0,5</b>

**Příloha 7:** Volná povrchová energie ( $\sigma_s$ ) 6. sady koronované PE fólie včetně její polární ( $\sigma_s^P$ ) a disperzní ( $\sigma_s^D$ ) složky a výběrových směrodatných odchylek ( $s$ ).

Měření	Vrchní strana			Spodní strana		
	$\sigma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]
1 (1. 2. 2023)	10,5	34,7	45,3	4,5	33,5	38,0
2 (1. 2. 2023)	4,6	40,9	45,5	4,9	32,5	37,4
3 (1. 2. 2023)	12,7	31,8	44,5	7,0	28,0	35,1
4 (1. 2. 2023)	12,9	32,0	45,0	7,4	30,3	37,7
<b>Průměr (A)</b>	<b>10,2</b>	<b>34,9</b>	<b>45,1</b>	<b>6,0</b>	<b>31,1</b>	<b>37,1</b>
<b>s</b>	<b>3,9</b>	<b>4,2</b>	<b>0,4</b>	<b>1,5</b>	<b>2,4</b>	<b>1,4</b>
1 (1. 2. 2023)	11,3	30,2	41,4	9,2	27,0	36,2
2 (1. 2. 2023)	12,6	29,8	42,4	5,6	30,2	35,8
3 (1. 2. 2023)	13,3	27,9	41,2	5,2	30,2	35,4
4 (1. 2. 2023)	13,7	26,8	40,5	5,0	28,6	33,6
<b>Průměr (B)</b>	<b>12,7</b>	<b>28,7</b>	<b>41,4</b>	<b>6,3</b>	<b>29,0</b>	<b>35,3</b>
<b>s</b>	<b>1,1</b>	<b>1,6</b>	<b>0,8</b>	<b>2,0</b>	<b>1,5</b>	<b>1,1</b>
1 (1. 2. 2023)	15,2	26,1	41,3	6,6	27,4	34,0
2 (1. 2. 2023)	12,1	27,1	39,2	4,7	30,0	34,6
3 (1. 2. 2023)	12,5	27,5	40,0	4,6	30,7	35,4
4 (1. 2. 2023)	14,1	26,9	41,0	4,4	30,0	34,4
<b>Průměr (C)</b>	<b>13,5</b>	<b>26,9</b>	<b>40,4</b>	<b>5,1</b>	<b>29,5</b>	<b>34,6</b>
<b>s</b>	<b>1,4</b>	<b>0,6</b>	<b>0,9</b>	<b>1,0</b>	<b>1,4</b>	<b>0,6</b>
1 (2. 2. 2023)	12,9	25,4	38,3	2,6	29,4	32,0
2 (2. 2. 2023)	14,3	23,1	37,4	2,5	30,6	33,1
3 (2. 2. 2023)	12,7	25,5	38,2	7,1	26,8	33,9
4 (2. 2. 2023)	11,9	25,4	37,3	7,8	26,0	33,8
<b>Průměr (D)</b>	<b>13,0</b>	<b>24,9</b>	<b>37,8</b>	<b>5,0</b>	<b>28,2</b>	<b>33,2</b>
<b>s</b>	<b>1,0</b>	<b>1,1</b>	<b>0,5</b>	<b>2,8</b>	<b>2,1</b>	<b>0,9</b>
1 (3. 2. 2023)	7,7	26,1	33,8	1,9	29,7	31,6
2 (3. 2. 2023)	7,5	26,7	34,3	1,6	29,9	31,5
3 (3. 2. 2023)	6,4	28,3	34,7	1,5	30,3	31,7
4 (3. 2. 2023)	8,3	26,6	35,0	2,2	30,3	32,5
<b>Průměr (E)</b>	<b>7,5</b>	<b>26,9</b>	<b>34,4</b>	<b>1,8</b>	<b>30,0</b>	<b>31,8</b>
<b>s</b>	<b>0,8</b>	<b>0,9</b>	<b>0,5</b>	<b>0,3</b>	<b>0,3</b>	<b>0,5</b>
1 (24. 2. 2023)	2,8	27,5	30,4	3,1	27,7	30,8
2 (24. 2. 2023)	2,8	27,1	30,0	2,9	28,5	31,4
3 (24. 2. 2023)	2,1	28,4	30,5	2,8	27,7	30,5
4 (24. 2. 2023)	2,6	27,5	30,1	3,0	27,6	30,6
<b>Průměr (F)</b>	<b>2,6</b>	<b>27,6</b>	<b>30,2</b>	<b>2,9</b>	<b>27,9</b>	<b>30,8</b>
<b>s</b>	<b>0,3</b>	<b>0,5</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>
1 (30. 3. 2023)	3,1	27,1	30,1	3,0	26,6	29,6
2 (30. 3. 2023)	2,8	28,1	30,9	2,8	26,5	29,3
3 (30. 3. 2023)	2,1	28,4	30,5	2,5	25,5	28,0
4 (30. 3. 2023)	2,6	27,7	30,3	2,2	27,4	29,6
<b>Průměr (G)</b>	<b>2,6</b>	<b>27,8</b>	<b>30,5</b>	<b>2,7</b>	<b>26,5</b>	<b>29,1</b>
<b>s</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>0,8</b>	<b>0,8</b>