

Univerzita Pardubice  
Fakulta chemicko-technologická  
Katedra polygrafie a fotofyziky

Úprava volné povrchové energie polypropylenu korunou a její změna v čase  
Bakalářská práce

University of Pardubice  
Faculty of Chemical Technology  
Department of Graphic Arts and Photophysics

Modification of the free surface energy of polypropylene by corona and its  
change over time  
Bachelor's Thesis

Univerzita Pardubice  
Fakulta chemicko-technologická  
Akademický rok: 2023/2024

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Nina Svítlová**  
Osobní číslo: **C21072**  
Studijní program: **B0531A130014 Polygrafie**  
Téma práce: **Úprava volné povrchové energie polypropylenu korunou a její změna v čase**  
Téma práce anglicky: **Modification of the free surface energy of polypropylene by corona and its change over time**  
Zadávající katedra: **Katedra polygrafie a fotofyziky**

## Zásady pro vypracování

1. Literární rešerše zaměřená na problematiku úpravy volné povrchové energie polymerních materiálů.
2. Literární rešerše zaměřená na měření a vyhodnocení volné povrchové energie polymerních materiálů.
3. U polypropylenové fólie změřte 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: **15. února 2024**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **1. července 2024**

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

L.S.

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

V Pardubicích dne 28. února 2024

Prohlašuji:

Práci s názvem Úprava volné povrchové energie polypropylenu korunou a její změna v čase 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 26. 6. 2024

Nina Svítlová v.r.

## **PODĚKOVÁNÍ**

Ráda bych poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Bohumilu Jašůrkovi, Ph.D. za jeho cenné rady, podporu a trpělivost během celého procesu psaní této práce. Také bych chtěla vyjádřit vděčnost své rodině a přátelům za jejich neustálou podporu a povzbuzování během mého studia.

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 zabývá změnou volné povrchové energie polypropylenu v průběhu času po úpravě koronovým výbojem. V experimentální části byla volná povrchová energie polypropylenové fólie vyhodnocena na základě naměřených hodnot kontaktních úhlů čtyř testovacích kapalin. Kontaktní úhel kapalin byl měřen metodou přisedlé kapky a volná povrchová energie byla vypočítána metodou Owens a Wendta. Změny volné povrchové energie byly sledovány v časových intervalech až 46 dnů od úpravy koronou.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

volná povrchová energie, povrchové napětí, koronový výboj, kontaktní úhel, polypropylen

## **TITLE**

Modification of the free surface energy of polypropylene by corona and its change over time

## **ANNOTATION**

This bachelor's thesis focused on the changes in the surface free energy of polypropylene over time after corona treatment. In the experimental part, the surface free energy of the polypropylene film was evaluated based on the measured contact angles of four test liquids. The contact angle of the liquids was measured using the sessile drop method, and the surface free energy was calculated using the Owens-Wendt method. Changes in the surface free energy were monitored at intervals up to 46 days after corona treatment.

## **KEYWORDS**

free surface energy, surface tension, corona discharge, contact angle, polypropylene

# OBSAH

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK .....	11
ÚVOD .....	12
1 TEORETICKÁ ČÁST .....	13
1.1 Volná povrchová energie .....	13
1.2 Povrchové napětí.....	13
1.3 Fázové rozhraní – kontaktní úhel.....	14
1.4 Způsoby měření volné povrchové energie.....	15
1.4.1 Metoda použití dynových per .....	15
1.4.2 Metoda měření kontaktního úhlu.....	15
1.4.2.1 Měření kontaktního úhlu na naklánějící se destičce .....	16
1.4.2.2 Měření kontaktního úhlu na přisedlé kapce nebo přilínající bublině.....	16
1.4.2.3 Kapilární elevace na svislé destičce.....	17
1.4.2.4 Vyvažování Wilhelmyho destičky.....	17
1.4.2.5 Analýza profilu kapky .....	18
1.5 Výpočet volné povrchové energie .....	18
1.5.1 Fowkesova metoda .....	18
1.5.2 Owens-Wendt metoda.....	19
1.5.3 Zismanova metoda.....	20
1.5.4 Wuova metoda .....	20
1.5.5 Schultzova metoda.....	21
1.5.6 Acidobazická teorie .....	21
1.5.7 Rozšířená Fowkesova metoda .....	21
1.5.8 Stavová rovnice.....	22
1.6 Způsoby zvýšení volné povrchové energie.....	22
1.6.1 Fyzikální způsoby .....	22
1.6.1.1 Koronový výboj.....	22
1.6.1.2 Plazma.....	23
1.6.1.3 Plamen .....	23
1.6.1.4 Krátkovlnné UV záření.....	24
1.6.1.5 Svazek urychlených elektronů.....	24
1.6.2 Chemické způsoby .....	24
1.6.2.1 Leptání povrchu pomocí kyselin.....	24
1.6.2.2 Reaktivní plyny – fluorace.....	25

1.7	Nejčastější polymery používané v polygrafii .....	25
1.7.1	Polypropylen .....	25
1.7.2	Polyethylen .....	26
1.7.3	Polyethylentereftalát .....	26
1.7.4	Polystyren .....	26
1.8	Výsledky podobných studií úpravy volné povrchové energie polypropylenu .....	26
2	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	28
2.1	Polymerní fólie .....	28
2.2	Testovací kapaliny .....	28
2.2.1	Ethylenglykol .....	28
2.2.2	Formamid .....	28
2.2.3	Dijodmethan .....	28
2.3	Použité přístroje a vybavení .....	28
2.3.1	Koronovací zařízení Lab Treator ASL 400 TUM .....	28
2.3.2	Goniometr OCA 50EC a software SCA 20 .....	29
2.4	Postup měření .....	31
2.5	Výsledky a diskuse .....	33
2.5.1	Měření polypropylenové fólie před úpravou koronovým výbojem .....	33
2.5.2	Měření polypropylenové fólie po úpravě koronovým výbojem .....	34
2.5.2.1	Měření 1. sady PP fólií upravené jedním průjezdem koronovací hlavy .....	35
2.5.2.2	Měření 2. sady PP fólií upravené jedním průjezdem koronovací hlavy .....	36
2.5.2.3	Měření 3. sady PP fólií upravené dvěma průjezdy koronovací hlavy .....	38
2.5.2.4	Měření 4. sady PP fólií upravené třemi průjezdy koronovací hlavy .....	39
2.5.3	Porovnání oproti podobným studiím úpravy volné povrchové energie .....	41
3	ZÁVĚR .....	42
4	POUŽITÁ LITERATURA .....	44
	PŘÍLOHY .....	47

## SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1: Vizuální znázornění Youngovy rovnice [6] .....	14
Obrázek 2: Ukázka dobrého (vlevo) a špatného (vpravo) smáčení pevné látky kapalinou.....	15
Obrázek 3: Měření kontaktního úhlu na nakloněné destičce [7] .....	16
Obrázek 4: Znázornění přisedlé kapky (vlevo) a přilínající bubliny (vpravo) [7].....	16
Obrázek 5: Kapilární elevace na svislé destičce [8] .....	17
Obrázek 6: Vyvažování Wilhelmyho destičky [9] .....	17
Obrázek 7: Analýza tvaru visící a přisedlé kapky [10].....	18
Obrázek 8: Vyhodnocení volné povrchové energie metodou Owense a Wendta pomocí čtyř kapalin.....	20
Obrázek 9: Koronovací zařízení ASL 400 TUM.....	29
Obrázek 10: Goniometr OCA 50EC připojený k počítači se spuštěným softwarem SCA 20..	30
Obrázek 11: Stříkačka Hamilton 500 $\mu$ l upevněná v goniometru.....	30
Obrázek 12: Rovnice přímky pro výpočet polární ( $\gamma_{sg}^p$ ) a disperzní složky ( $\gamma_{sg}^d$ ) volné povrchové energie metodou Owens-Wendt.....	32

Tabulka 1: Hodnoty povrchových napětí čtyř základních kapalin pro teplotu 20 °C [5].....	14
Tabulka 2: Volná povrchová energie vybraných polymerů [6].....	25
Tabulka 3: Hodnoty měření volné povrchové energie neupravené PP fólie (vrchní strana)....	33
Tabulka 4: Hodnoty měření volné povrchové energie neupravené PP fólie (spodní strana) ...	34
Tabulka 5: Hodnoty měření volné povrchové energie první sady PP fólií (vrchní strana) .....	35
Tabulka 6: Hodnoty měření volné povrchové energie první sady PP fólií (spodní strana).....	35
Tabulka 7: Hodnoty měření volné povrchové energie druhé sady PP fólií (vrchní strana).....	37
Tabulka 8: Hodnoty měření volné povrchové energie druhé sady PP fólií (spodní strana) .....	37
Tabulka 9: Hodnoty měření volné povrchové energie třetí sady PP fólií (vrchní strana) .....	38
Tabulka 10: Hodnoty měření volné povrchové energie třetí sady PP fólií (spodní strana).....	38
Tabulka 11: Hodnoty měření volné povrchové energie čtvrté sady PP fólií (vrchní strana)....	40
Tabulka 12: Hodnoty měření volné povrchové energie čtvrté sady PP fólií (spodní strana) ...	40

# ÚVOD

Mezi hlavní parametry, kterými lze charakterizovat povrch látek, je volná povrchová energie a povrchové napětí. Volná povrchová energie se stanovuje u pevných látek a povrchové napětí se stanovuje u kapalin. Tyto vlastnosti jsou klíčové při určování chování kapalin na povrchu pevných látek, například zda bude kapalina povrch smáčet či jakou adhezi budou vykazovat. V polygrafii je znalost těchto vlastností důležitá zejména při výběru tiskových barev a potiskovaných substrátů, kdy je důležité dosáhnouti dobrého rozprostírání tiskových barev a laků na povrchu substrátu a zároveň dosažení dobré adheze mezi materiály.

Volnou povrchovou energii u pevných materiálů lze upravit několika metodami. Mezi neznámější patří úprava povrchu koronovým výbojem, plamenem, plazmovým výbojem nebo také fluorací. Volba vhodné metody závisí na několika parametrech: typu materiálu, jeho tvaru, tloušťce nebo rozsahu požadované úpravy. Volnou povrchovou energii je možno určovat různými metodami. Jednou z nejvýznamnějších metod pro výpočet polární a disperzní složky volné povrchové energie je metoda Owense a Wendta. Tato metoda využívá naměřené hodnoty kontaktních úhlů vybraných kapalin k výpočtu povrchové energie materiálu.

Nejpoužívanější polymerní materiály v polygrafii, u kterých se nejčastěji řeší úprava povrchové energie, je polyethylen, polypropylen a polyethylentereftalát. Problémem při potisku těchto materiálů (zejména u polyethylenu a polypropylenu) je jejich nízká povrchová energie, kterou je nutné před tiskem zvýšit.

V této bakalářské práci jsem řešila změnu volné povrchové energie polypropylenu v čase po úpravě koronovým výbojem. Změny byly měřeny v časovém rozmezí až 46 dnů po úpravě koronovým výbojem.

# 1 TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 Volná povrchová energie

Volná povrchová energie je míra nadbytečné energie přítomné na povrchu materiálu ve srovnání s jeho objemem. Bývá použita k popisu smáčení a adheze mezi materiály. V článku [1] je vysvětlena volná povrchová energie tímto způsobem: Vnitřní struktura materiálu je stabilní a její atomy mají rovnoměrně rozložené vazby/interakce, zatímco atomy na povrchu materiálu mají neúplné, nevyvážené vazby/interakce. Povrch materiálu se vždy snaží minimalizovat svou volnou povrchovou energii. Toho může být dosaženo absorpcí jiného materiálu s nižší povrchovou energií na jeho povrchu. Díky této absorpci se počet atomů s vysokou povrchovou energií, které jsou na povrchu sníží a nahradí se atomy nebo molekuly s nižší povrchovou energií.

Další možnost definice volné povrchové energie je jako množství práce  $W$  potřebné pro vytvoření nového povrchu o jednotkové ploše  $\Delta A$  [2]. Obvyklé značení pro volnou povrchovou energii je malé řecké písmeno sigma  $\sigma$  a jednotkou je  $\text{Jm}^{-2}$ . Číselně i rozměrově jsou si hodnoty volné povrchové energie a povrchového napětí rovny.

## 1.2 Povrchové napětí

Povrchové napětí je síla, která způsobuje, že se molekuly na povrchu kapaliny snaží stlačit co nejbližší k sobě a vytvořit vrstvu, které se začne chovat jako elastická membrána. Takto se snaží dosáhnout stavu s minimální energií. Je to napětí povrchové vrstvy kapaliny způsobené přitažlivostí částí v této vrstvě k celkovému objemu kapaliny, což vede k tendenci minimalizovat plochu povrchu [3]. Povrchové napětí je ovlivňováno změnou teploty (s rostoucí teplotou klesá), ale také přidávkem povrchově aktivních látek.

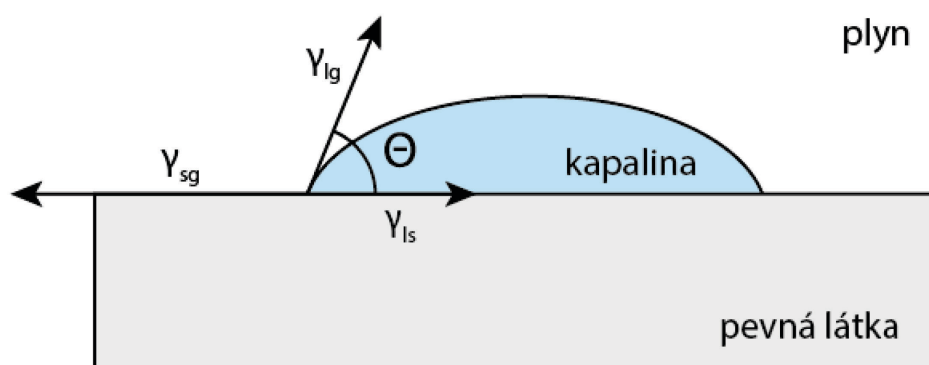
Povrchové napětí je rovno podílu velikosti síly působící kolmo k povrchu kapaliny a délky okraje této vrstvy. Jako značka povrchového napětí je nejčastěji udáváno malé řecké písmeno gama  $\gamma$  a jednotkou je  $\text{Nm}^{-1}$  [4]. V Tabulce 1 [5] jsou uvedené hodnoty povrchového napětí  $\gamma_1$  a jejich polární  $\gamma_1^p$  a disperzní  $\gamma_1^d$  složka u čtyř kapalin, které byly v této práci použity k určení volné povrchové energie polypropylenu. Jejich hodnoty byly naměřeny při teplotě 20 °C.

Tabulka 1: Hodnoty povrchových napětí čtyř základních kapalin pro teplotu 20 °C [5]

Kapaliny	$\gamma_l$ (mNm <sup>-1</sup> )	$\gamma_l^d$ (mNm <sup>-1</sup> )	$\gamma_l^p$ (mNm <sup>-1</sup> )
Destilovaná voda	72,8	21,8	51
Formamid	58	39	19
Dijodmethan	50,8	50,8	0
Ethylen glykol	48	29	19

### 1.3 Fázové rozhraní – kontaktní úhel

Rozlišujeme tři fázová rozhraní pro tři stavy skupenství (plyn, kapalina, pevná látka). Mírou smáčivosti je kontaktní úhel, který se určuje jako úhel na průřezu obrysu kapky s rovinou povrchu [6]. Podle Youngovy rovnice definujeme vztah mezi kontaktním úhlem  $\Theta$ , povrchovým napětím kapaliny  $\gamma_{lg}$ , mezifázovým napětím mezi kapalinou a pevnou látkou  $\gamma_{sl}$  a volnou povrchovou energií pevné látky  $\gamma_{sg}$  (Obrázek 1) [6]. Kontaktní úhly několika kapalin se dále používají pro výpočet volné povrchové energie pevné látky.



Obrázek 1: Vizuální znázornění Youngovy rovnice [6]

Youngova rovnice pro rovnovážný stav má toto znění:

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

V případě dokonalého smáčení je kontaktní úhel 0° (kapalina je plně rozprostřena na povrchu pevné látky), mezi 0° a 90° je pevná látka dobře smáčena kapalinou a nad 90° není smáčena (Obrázek 2). Podle smáčivosti vodou můžeme rozdělit materiály na dva typy: hydrofilní, které jsou smáčené vodou a mají vysokou povrchovou energii, a hydrofobní, které nejsou smáčené vodou a mají nízkou povrchovou energii [2].

Mezimolekulární síly, které v kapalinách a pevných látkách působí, mají polární a nepolární složky. Mezi tyto síly patří vodíkové vazby, Coulombovy dipólové interakce, disperzní síly, interakce mezi indukovanými dipóly a iontovými vazbami [6].



Obrázek 2: Ukázka dobrého (vlevo) a špatného (vpravo) smáčení pevné látky kapalinou

## 1.4 Způsoby měření volné povrchové energie

Přímé měření volné povrchové energie je obtížné, a proto se používá řada nepřímých metod. Jednou z nejpoužívanějších metod je metoda měření kontaktního úhlu kapaliny usazené na měřeném povrchu. Další z nejrozšířenějších metod je metoda tzv. „dynových per“. Při této metodě se využívají testovací kapaliny o různých velikostech povrchového napětí a sleduje se jejich interakce s povrchem měřené pevné látky. Takto ale můžeme určit pouze tzv. kritickou povrchovou energii [2].

### 1.4.1 Metoda použití dynových per

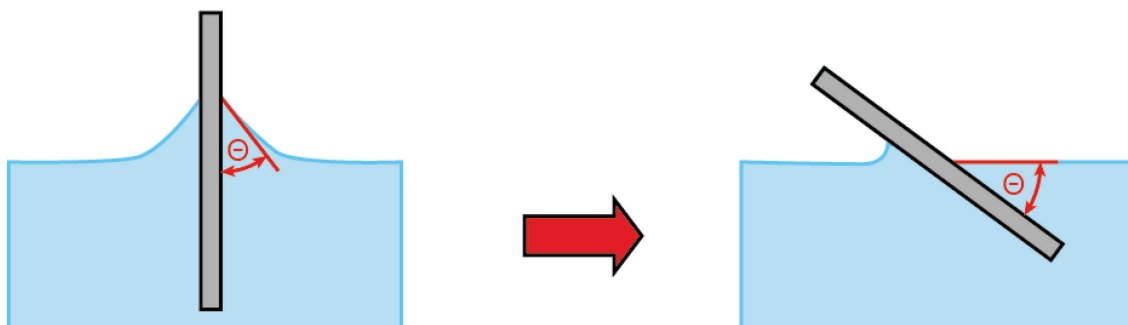
Pomocí sady těchto testovacích kapalin (ve formě fix nebo lahvičky s aplikačním štětečkem) se postupně provede nanesení těchto kapalin na povrch materiálu (aplikace se provádí od nejnižších hodnot povrchového napětí k nejvyšším). Pokud je povrchové napětí testovací kapaliny větší než volná povrchová energie materiálu, utvoří se na povrchu materiálu kapičky. V opačném případě na povrchu zůstane homogenní vrstva testovací kapaliny. Hodnota kritické povrchové energie se poté stanoví jako hodnota povrchového napětí té testovací kapaliny, u které se jako první vytvořily kapičky na povrchu materiálu [2].

### 1.4.2 Metoda měření kontaktního úhlu

Zde se využívá měření kontaktního úhlu mezi testovací kapalinou (u které je známé povrchové napětí) a povrchem pevné látky s neznámou volnou povrchovou energií [2].

### 1.4.2.1 Měření kontaktního úhlu na naklánějící se destičce

Destička z testované látky je ponořena do kapaliny, a poté nakláněna, dokud hladina kapaliny na jedné straně destičky nedosáhne roviny až k linii styku mezi destičkou a kapalinou [7]. V tomto okamžiku hladina kapaliny svírá s rovinou destičky kontaktní úhel (Obrázek 3). Při měření je důležitá čistota jak měřené kapaliny, tak zkoumané destičky. Tato metoda se používala pro měření malých úhlů. Jedná se o přímou metodu měření.



Obrázek 3: Měření kontaktního úhlu na nakloněné destičce [7]

### 1.4.2.2 Měření kontaktního úhlu na přisedlé kapce nebo přilínající bublině

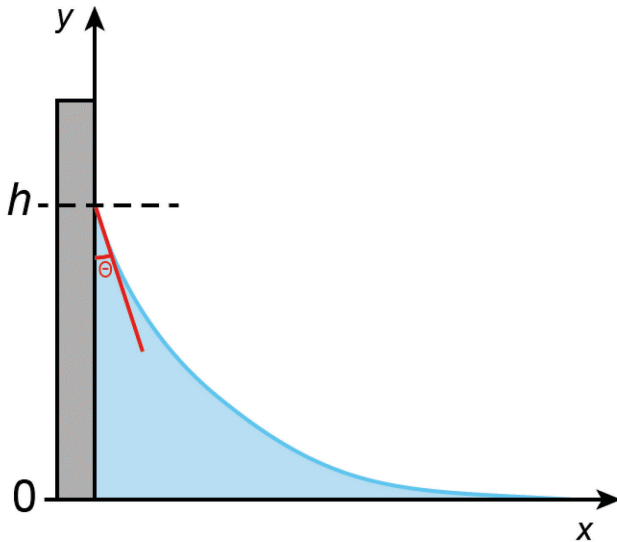
Přisedlá kapka nebo bublina přiléhající k pevné látce ponořené do kapaliny je pozorována mikroskopem, který umožňuje přímo měřit kontaktní úhel nebo se úhel určuje z fotografie kapky (Obrázek 4) [7]. V obou případech přesnost ovlivňují zkušenosti osoby provádějící měření. Jedná se o přímou metodu měření.



Obrázek 4: Znáznornění přisedlé kapky (vlevo) a přilínající bubliny (vpravo) [7]

### 1.4.2.3 Kapilární elevace na svislé destičce

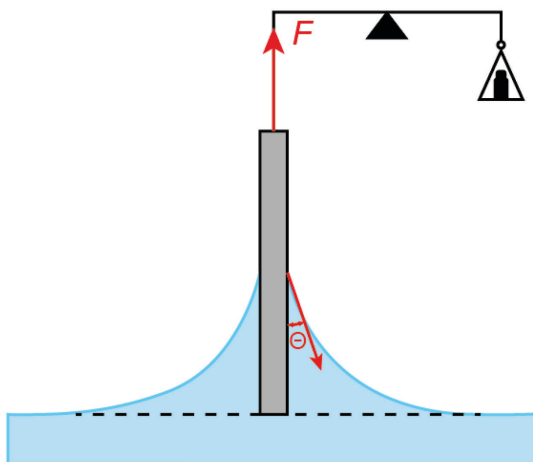
Tato metoda spočívá v měření výšky  $h$ , do které meniskus stoupne na svislém povrchu destičky ponořené do kapaliny (Obrázek 5) [8]. Používá se k měření kontaktního úhlu mezi kapalinou a pevnou látkou, ale povrch pevné látky musí být homogenní. Metoda je vhodná pro měření teplotní závislosti kontaktního úhlu [8]. Jedná se o nepřímou metodu měření.



Obrázek 5: Kapilární elevace na svislé destičce [8]

### 1.4.2.4 Vyvažování Wilhelmyho destičky

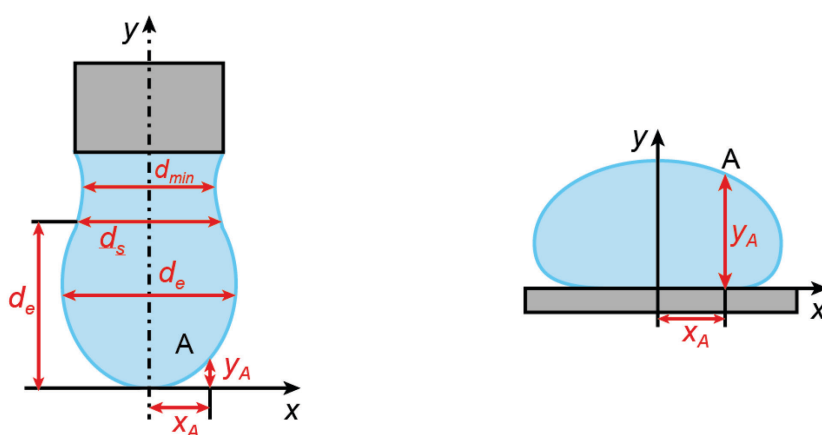
Statická metoda, která spočívá v měření síly  $F$  potřebné k vyvážení rovné svislé destičky ponořené do kapaliny [9]. Tato síla se měří pomocí vysoce citlivých vah (Obrázek 6). Povrch destičky musí být homogenní a materiál destičky nesmí bobtnat. Jedná se o nepřímou metodu měření.



Obrázek 6: Vyvažování Wilhelmyho destičky [9]

### 1.4.2.5 Analýza profilu kapky

V této metodě se porovnává skutečný profil kapky s teoretickým tvarem daným Laplaceovou-Youngovou rovnicí [10]. Postupně se z fotografie nebo obrazu přisedlé nebo visící kapky v mikroskopu odečítají charakteristické geometrické parametry, jako jsou průměry  $d_e$ ,  $d_s$ ,  $d_{min}$ , nebo souřadnice bodů profilu kapky  $x_A$ ,  $y_A$  (Obrázek 7). Tyto parametry jsou poté porovnány s tabelovanými hodnotami, které byly vypočítány numerickou interakcí Laplaceovy rovnice pro různé hodnoty povrchového napětí a poloměry křivosti ve vrcholu kapky. Měření je možné u malého množství látek a lze tohoto postupu měření využít i za experimentálně obtížných podmínek. Jedná se o nepřímou metodu měření.



Obrázek 7: Analýza tvaru visící a přisedlé kapky [10]

## 1.5 Výpočet volné povrchové energie

### 1.5.1 Fowkesova metoda

Fowkes předpokládal, že volná povrchová energie pevných látek je určena přitažlivými aditivními silami mezi povrchovou vrstvou pevné látky a kapalinou. V jeho teorii sehrávají klíčovou roli Londonovy disperzní síly (v rovnici 2 značeny horním indexem  $d$ ), které se vyskytují ve všech typech hmot a působí mezi sousedními atomy a molekulami [11]. Díky těmto představám Fowkes vyjádřil mezifázovou energii mezi pevnou látkou a kapalinou  $\gamma_{sl}$  pouze prostřednictvím disperzních interakcí. Takto mohl také stanovit vztah popisující tuto energii [11]:

$$\gamma_{sl} = \gamma_s + \gamma_l - 2\sqrt{\gamma_s^d \gamma_l^d} \quad (2)$$

$\gamma_s$  je volná povrchová energie pevné látky,  $\gamma_l$  je povrchové napětí kapaliny.

Fowkesova metoda se používá pro stanovení volné povrchové energie polymerních materiálů. Je obzvláště vhodná, pokud je aplikovaná na nepolární polymery. Tato metoda je založena na nezávislosti a aditivnosti disperzních a polárních interakcí, přičemž každá odpovídá určitému druhu mezimolekulární interakce [12]. Při použití Fowkesovy metody se doporučuje použít vodu a diiodmethan, voda je kapalina s dominantní polární složkou a diiodmethan je disperzní kapalina [12].

### 1.5.2 Owens-Wendt metoda

V této metodě byly učiněny podobné předpoklady jako ve Fowkesově metodě. Tyto dvě metody, které jsou identické z matematického hlediska, se mírně liší způsobem výpočtu volné povrchové energie [12]. Owens-Wendt metoda je jednou z nejběžnějších metod pro výpočet volné povrchové energie polymerních materiálů. Zde se kromě disperzních sil uvažuje i interakce vodíkových můstků [11]. Předpokládá se, že celková povrchová energie se skládá ze dvou složek, a to z disperzní složky (v rovnicích 3, 4 a 5 označeno horním indexem  $d$ ) a polární složky (horní index  $p$ ).

Adhezní energii  $W_a$  je možné vyjádřit pomocí součtu polárních a nepolárních složek povrchové energie [6]:

$$W_a = 2((\gamma_{sg}^d \cdot \gamma_{lg}^d)^{0,5} + (\gamma_{sg}^p \cdot \gamma_{lg}^p)^{0,5}) \quad (3)$$

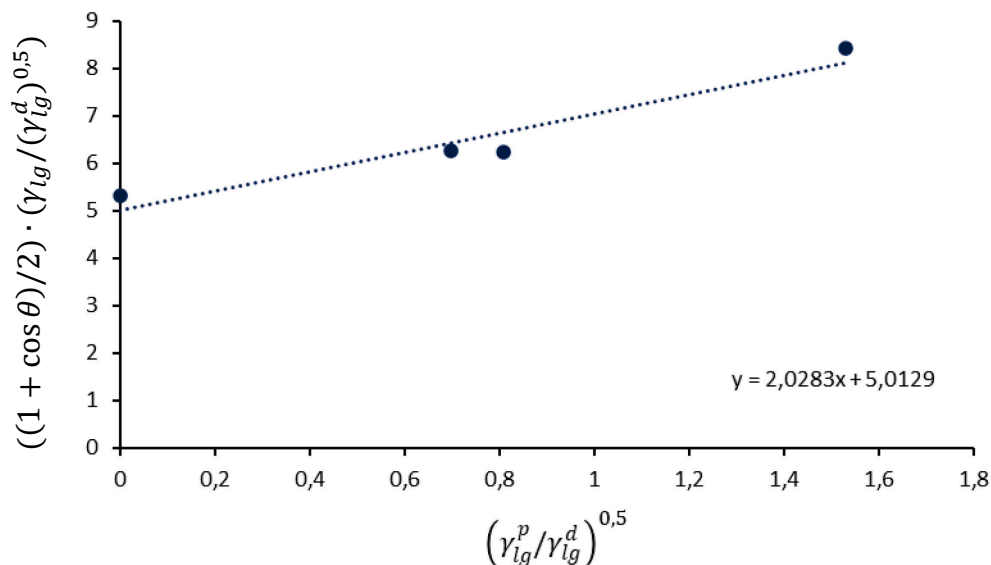
S použitím rovnice (3), Youngovy rovnice (1) a kontaktních úhlů dvou a více kapalin, u kterých známe jak hodnoty polární, tak disperzní složky povrchového napětí, lze vypočítat polární a disperzní složku volné povrchové energie pevné látky [5]:

$$(1 + \cos \theta) \gamma_{lg} = 2((\gamma_{sg}^d \cdot \gamma_{lg}^d)^{0,5} + (\gamma_{sg}^p \cdot \gamma_{lg}^p)^{0,5}) \quad (4)$$

Tato rovnice se také dá vyjádřit ve tvaru přímky, to nám umožní vyhodnotit volnou povrchovou energii více než dvěma kapalinami pomocí lineární regrese:

$$((1 + \cos \theta)/2) \cdot (\gamma_{lg}/\gamma_{lg}^d)^{0,5} = (\gamma_{sg}^p)^{0,5} \cdot (\gamma_{lg}^p/\gamma_{lg}^d)^{0,5} + (\gamma_{sg}^d)^{0,5} \quad (5)$$

Na Obrázku 8 je ukázán příklad vyhodnocení volné povrchové energie pomocí čtyř kapalin. Konkrétní příklad je z experimentální části této práce z vyhodnocení volné povrchové energie u vrchní strany (strana s vyšší hodnotou volné povrchové energie) polypropylenové fólie bez úpravy koronovým výbojem.



Obrázek 8: Vyhodnocení volné povrchové energie metodou Owense a Wenda pomocí čtyř kapalin

Tato metoda byla dále používána ve vyhodnocování volné povrchové energie v experimentální části bakalářské práce.

### 1.5.3 Zismanova metoda

Tato metoda se používá k určení tzv. kritického Zismanova napětí  $\gamma_c$ . Podle Zismana je hodnota Zismanova napětí rovna hodnotě povrchového napětí kapaliny, která je v kontaktu s měřenou pevnou látkou a u které je naměřený nulový kontaktní úhel [12]. Hodnota kritického Zismanova napětí se stanovuje graficky ze závislosti kosinu kontaktního úhlu na povrchovém napětí kapaliny. Výsledkem je přímka, kdy povrchové napětí kapaliny při kosinu kontaktního úhlu rovné jedné je hledaná hodnota kritického Zismanova napětí. Zismanova rovnice má tento tvar [11]:

$$\cos \theta = 1 + b \cdot (\gamma_c - \gamma_l) \quad (6)$$

konstanta  $b$  má charakteristickou hodnotu vždy pro sadu použitých kapalin.

### 1.5.4 Wuova metoda

Tato teorie předpokládá stejně jako Fowkesova metoda, že celková povrchová energie se skládá z polární a disperzní části. V případě této metody se ale používá místo geometrického průměru průměr harmonický [11].

Mezipovrchové napětí mezi kapalinou a pevnou látkou se vypočítá na základě povrchového napětí kapaliny a volné povrchové energie pevné látky a podobných interakcí mezi fázemi. Tyto interakce se interpretují jako harmonický průměr disperzní části a polární části povrchového

napětí nebo volné povrchové energie [13]. Pro výpočet mezifázové energie  $\gamma_{sl}$  se použije následující vztah [11]:

$$\gamma_{sl} = \gamma_s + \gamma_l - 4 \left( \frac{\gamma_s^d \gamma_l^d}{\gamma_s^d + \gamma_l^d} + \frac{\gamma_s^p \gamma_l^p}{\gamma_s^p + \gamma_l^p} \right) \quad (7)$$

### 1.5.5 Schultzova metoda

Tato metoda se používá v případě měření materiálů s vysokou volnou povrchovou energií, kde je smáčení téměř dokonalé a měření volné povrchové energie z kontaktního úhlu se stává nemožné [14]. Jedná se o metodu, kdy se měří kontaktní úhel testovací kapaliny, která je spolu s měřeným pevným materiálem ponořena ve druhé kapalině [11]. V tomto případě nesmí být kapaliny mísitelné. Upravená Youngova rovnice pro tuto metodu vypadá následovně [14]:

$$\gamma_{sl_2} = \gamma_{sl_1} + \gamma_{l_1 l_2} \cos \theta_{sl_1} \quad (8)$$

kde  $\gamma_{sl_2}$  je mezifázová energie mezi pevnou látkou a kapalinou obklopující látku,  $\gamma_{sl_1}$  je mezifázová energie mezi pevnou látkou a testovací kapalinou a  $\gamma_{l_1 l_2}$  je mezifázová energie rozhraní použitých kapalin.

### 1.5.6 Acidobazická teorie

Interakce mezi fázemi (mezi kapalinou a pevnou látkou) se interpretují jako geometrický průměr disperzní části a příslušných kyselých částí (v rovnici 9 označené horním indexem +) a bazických částí (horní index -) povrchového napětí nebo volné povrchové energie [15]. Podle Lewisovy acidobazické teorie dochází k polárním interakcím, když akceptor elektronu (Lewisův kyselý parametr) naráží na donor elektronu (Lewisův zásaditý parametr) [11]. Mezifázová energie se vypočítá následovně [11]:

$$\gamma_{sl} = \gamma_s + \gamma_l - 2 \left( \sqrt{\gamma_l^d \cdot \gamma_s^d} + \sqrt{\gamma_l^- \cdot \gamma_s^+} + \sqrt{\gamma_l^+ \cdot \gamma_s^-} \right) \quad (9)$$

### 1.5.7 Rozšířená Fowkesova metoda

Na základě Fowkesovy metody a Owens-Wendt metody se mezipovrchové napětí mezi kapalinou a pevnou látkou vypočítá na základě povrchového napětí kapaliny a volné povrchové energie pevné látky a interakcí mezi fázemi [16]. Volná povrchová energie se dělí na polární a disperzní část, z polární části se navíc odděluje část související s interakcí vodíkových můstků (v rovnici 10 označené horním indexem  $h$ ) [11]. Pro mezifázovou energii zde platí tento vztah [11]:

$$\gamma_{sl} = \gamma_l + \gamma_s - 2 \left( \sqrt{\gamma_l^d \cdot \gamma_s^d} + \sqrt{\gamma_l^p \cdot \gamma_s^p} + \sqrt{\gamma_l^h \cdot \gamma_s^h} \right) \quad (10)$$

### 1.5.8 Stavová rovnice

Používá se u výpočtu volné povrchové energie pevných látek a na základě termodynamického přístupu jsou mezifázová napětí vzájemně spojena stavovou rovnicí [11]. Bylo zjištěno, že mezifázové napětí mezi kapalinou a pevnou látkou závisí pouze na hodnotě povrchového napětí kapaliny a volné povrchové energii pevné látky, ale jsou nezávislé na konkrétních mezimolekulárních silách kapalin a pevných látek [17]. Takto vznikla rovnice 11, kde  $f$  je neznámá funkce [17]:

$$\gamma_{sl} = f(\gamma_{lg}, \gamma_{sg}) \quad (11)$$

Postupem času vznikly různé návrhy tvaru stavové rovnice, mezi ně patří Berthelův tvar, Antonowův tvar, Good a Girifalcovův tvar, Ward a Neumannův tvar, Li a Neumannův tvar, Kwok a Neumannův tvar anebo Wuův tvar [11].

## 1.6 Způsoby zvýšení volné povrchové energie

Vysoká povrchová energie je důležitá pro smáčení povrchu pevné látky kapalinou. Většina pevných látek s vysokou povrchovou energií si tuto energii neudrží [1]. Povrchové úpravy jsou navrženy tak, aby zvýšily energii odstraněním znečišťujících látek nebo vytvořením funkčních skupin s vysokou volnou povrchovou energií. Tyto techniky často poskytují jen dočasné zvýšení povrchové energie.

### 1.6.1 Fyzikální způsoby

#### 1.6.1.1 Koronový výboj

Koronová úprava je v průmyslu osvědčená metoda, která zvyšuje polaritu povrchů. Využívá koronového výboje, při kterém vzniká plazma. Plazma je velmi reaktivní plyn obsahující ionty, radikály a reaktivní ozon. Tento plyn reaguje s povrchy polymerů, především rozkladem vazeb mezi vodíkem a uhlíkem, což vede ke vzniku polárních skupin, jako jsou karbonylové a karboxylové skupiny [18]. Tyto polární skupiny zvyšují polární složku povrchové energie, a tím i celkovou volnou povrchovou energii. Vysoká energie při ošetření povrchu korunou zvyšuje jeho volnou povrchovou energii pouze do bodu nasycení [18]. Při dosažení určité dávky korony dosáhne povrch maximální koncentrace radikálů a další dávka korony již volnou povrchovou energii nezvyšuje. Jedním z vedlejších účinků je štěpení polymerních řetězců (vazby mezi uhlíky) na povrchu polymeru, což vede ke tvorbě krátkých molekulárních

řetězců [18]. Na druhou stranu může vést vyšší dávka korony i k zvýšení molekulové hmotnosti díky zesíťování lineárních polymerních molekul [18]. Ačkoliv koronové ošetření zvyšuje povrchovou energii, tato energie se postupem času snižuje. To zapříčiňuje restrukturační povrchu a reakce funkčních skupin na povrchu vzniklých oxidací.

Tato metoda se běžně používá k ošetření materiálů jako je polyethylen (PE), polypropylen (PP), nylon, vinyl, polyethylentereftalát (PET), polyvinylchlorid (PVC) nebo také pokovené povrchy a fólie [18]. Tento způsob zvýšení volné povrchové energie byl použit k úpravě povrchu polypropylenu v experimentální části této bakalářské práce.

#### **1.6.1.2 Plazma**

Plazma je čtvrtý stav hmoty (první tři jsou kapaliny, plyny a pevné látky). Vzniká dodáváním energie plynu, kdy dochází k ionizaci plynu. Tento proces vytváří směs volných elektronů a iontů. Pokud je ionizováno dostatečné množství molekul, výsledkem se stane plazma, jelikož se změní celkové elektrické vlastnosti plynu [19].

Plazmové ošetření je většinou prováděno v komoře, kde je vzduch odčerpán a nahrazen jiným plynem (např.  $N_2$ ) za nízkého tlaku. Poté se aplikuje energie ve formě elektrické energie na plyn, který se následovně ionizuje [19]. Plazmové ošetření je proces, u kterého se nevyskytují vysoké teploty, proto je tento proces vhodný i pro teplotně citlivé materiály.

Vystavení povrchu polymeru energetickým částicím rozkládá tento povrch a vytváří volné radikály, plazma také obsahuje UV záření, což vytváří další volné radikály. Volné radikály rychle reagují se samotným materiálem a umožňují vytvářet stabilní kovalentní vazby, které zvyšují celkovou volnou povrchovou energii [20].

Plazmové ošetření se nejčastěji používá k modifikaci polymerních fólií a různých plastových dílů (např. automobilový, strojírenský a elektrotechnický průmysl nebo medicínské účely). Tyto povrchy je nutné upravit před pokovením, potiskem nebo lepením.

#### **1.6.1.3 Plamen**

Při tomto ošetření je substrát přímo vystaven plameni na krátkou dobu. Samotný plamen nese přebytečný kyslík, který se účastní spalování, a vytváří meziprodukty ve formě aktivních iontů, mezi ně patří hydroxylové a karboxylové skupiny [21]. Tyto ionty se vážou na povrch materiálu a vytvářejí tak polární skupiny, které zvyšují celkovou volnou povrchovou energii [21]. Samotné ošetření tedy nevyužívá teplo plamene, ale kontrolované chemické vlastnosti plamene.

Hlavní využití ošetření plamenem je úprava flexibilních obalů, automobilových dílů, konkrétně čelních nárazníků a vnitřních komponentů. Další významnou aplikací je ošetření částí spotřebičů a golfových míčků před nanášením povlaků a jejich potisku [22]. Úprava povrchu plamenem je ale využívána i v mnoha dalších průmyslových odvětvích díky možnosti aplikace na celý povrch materiálu nebo jen na konkrétní část, nebo také díky své schopnosti poskytovat rovnoměrnou úpravu povrchu.

#### **1.6.1.4 Krátkovlnné UV záření**

Na rozdíl od plazmových procesů se při tomto způsobu ošetření povrchu materiálu používá krátkovlnné UV záření. Vysoce energetické fotony emitované UV zdroji záření jsou nenabitě a nemají hybnost zrychlených iontů [23]. Tato metoda také např. umožňuje odstranit z povrchu lisovaných plastových dílů separační prostředky. UV záření se také běžně využívá k vytvrzování fotopolymerů. Tato metoda je vhodná pro různé materiály a její hlavní předností je schopnost upravovat geometricky složité objekty.

#### **1.6.1.5 Svazek urychlených elektronů**

Zde se využívají urychlené elektrony k ovlivnění vlastností materiálu. Jak taková metoda funguje popisuje zdroj [24]. Urychlené elektrony jsou generovány elektrickým ohřevem vlákna a tento proces pobíhá ve vakuu. Elektrony jsou následně urychleny aplikací napěťového potenciálu, následně uniknou z vakua tím, že proniknou tenkou kovovou fólií do atmosférického tlaku. Následně tyto urychlené elektrony pronikají do upravovaného materiálu, kde rozbíjejí chemické vazby. Takto zahájí chemickou reakci na povrchu materiálu, kdy dojde k modifikaci tenké povrchové vrstvy a zvýšení volné povrchové energie.

Technologie úpravy povrchu materiálů pomocí urychlených elektronů se využívá v mnoha oblastech. Mezi hlavní materiály, které je možné touto metodou upravit, patří flexibilní obaly, materiály využívané pro vakuové balení, tepelně smrštitelné fólie nebo obaly z lepenky [24].

### **1.6.2 Chemické způsoby**

#### **1.6.2.1 Leptání povrchu pomocí kyselin**

Leptání povrchu pomocí kyselin zahrnuje ponoření pevné látky do vodného roztoku kyseliny za účelem odstranění volné vrstvy oxidu z jeho povrchu [25]. Kyselina, která se použije, závisí na materiálu, který je zpracováván. Tato metoda povrchové úpravy se častěji používá u kovů než u polymerů.

### 1.6.2.2 Reaktivní plyny – fluorace

Polymerní povrchy se fluorují vystavením směsi obsahující fluor. Fluor díky své vysoké reaktivitě částečně nahrazuje atomy vodíku na povrchu upravovaného materiálu [26]. Fluorace zvyšuje drsnost povrchu a tím zvětšuje kontaktní plochu. Fluorace se nejčastěji používá pro zlepšení přilnavosti, když aplikace vyžaduje rovnoměrnou a vysokou přilnavost aplikovaných vrstev na upravovaný materiál.

## 1.7 Nejčastější polymery používané v polygrafii

Možnosti použití polymerů výrazně závisí na jejich povrchových vlastnostech, které se mění nejen v závislosti na teplotě, ale také v průběhu času. Proto je úprava volné povrchové energie nezbytná pro zlepšení vlastností ovlivňující kvalitu tisku, laminaci nebo adhezi materiálů. Tato úprava však není trvalá a po určité době se hodnota volné povrchové energie vrací k původní (nízké) hodnotě. V Tabulce 2 [6] jsou uvedeny hodnoty volné povrchové energie nejčastěji používaných polymerů v polygrafii.

Tabulka 2: Volná povrchová energie vybraných polymerů [6]

Polymerní materiály	Volná povrchová energie (mJ/m <sup>2</sup> )
Polypropylen (PP)	29,4–30,1
Polyethylen (PE)	32,4–35,7
Polyethylentereftalát (PET)	44,6
Polystyren (PS)	40,7

### 1.7.1 Polypropylen

Polypropylen (PP) je významný polymer v polygrafickém průmyslu. Tento termoplastický polymer patří do skupiny polyolefinů. Díky jeho vlastnostem jako je nízká hmotnost, dobrá pevnost, chemická odolnost a tepelná stabilita má široké využití v průmyslu [27]. Existují dva typy v závislosti na způsobu zpracování nebo orientaci, a to lité fólie a biaxiálně orientované fólie. Biaxiálně orientované fólie mají vynikající průhlednost a lesk, proto nachází uplatnění především v obalovém průmyslu.

Polypropylen je hodně používán pro výrobu vláken a textilií. Polypropylenové filmy jsou využívány v obalovém průmyslu (např. obaly na potraviny, ochranné obaly). Kontejnery na skladování potravin jsou také často vyráběny z polypropylenu pomocí vstřikování. Polypropylen získal větší pozornost v lékařském odvětví, jelikož má schopnost odolávat sterilizačním podmínkám [27].

### **1.7.2 Polyethylen**

Polyethylen (PE) je jedním z nejčastěji používaných polymerů díky vlastnostem jako je velmi dobrá chemická odolnost, vynikající izolační vlastnosti, pružnost a houževnatost [27]. Je dostupná široká škála různých druhů polyethylenu. Hlavními skupinami polyethylenu jsou vysokohustotní polyethylen (HDPE) a nízkohustotní polyethylen (LDPE). Nízkohustotní polyethylen se používá pro výrobu fólií (např. smršťovací fólie, přepravní tašky). Vysokohustotní polyethylen se díky své vyšší molekulové hmotnosti používá pro výrobu vyfukovaných a vstřikovaných výrobků (např. lahve, sudy, hračky, víčka), ale také na výrobu trubek [27]. Díky vynikajícím izolačním vlastnostem se také používá v kabelech a k pokrytí vodičů. Polyethylenové fólie se též využívají pro zemědělské účely a ve sklenících.

### **1.7.3 Polyethylentereftalát**

Polyethylentereftalát (PET) je organický materiál, který se vyrábí z ropy. Je to termoplast patřící do skupiny polyesterů a dnes je jedním z nejvýznamnějších termoplastických polyesterů [28]. Polyethylentereftalát je pevný, pružný, je odolný vůči vlhkosti a působení většiny kyselin a má dobré izolační vlastnosti. Jeho hlavní využití je v obalovém průmyslu (např. obaly šamponů, tekutých mýdel, čisticích prostředků), další využití je i ve zdravotnictví a automobilovém průmyslu [28].

### **1.7.4 Polystyren**

Polystyren (PS) má velmi dobré mechanické vlastnosti, tuhost, transparentnost, dobrou rozměrovou stabilitu a dobré tepelné izolační vlastnosti [27]. Používá se v obalovém průmyslu (např. transparentní obaly, tácky, kelímky, potravinové obaly), nábytku, domácích potřebách nebo spotřebičích.

## **1.8 Výsledky podobných studií úpravy volné povrchové energie polypropylenu**

Jelikož jsem se v této práci zabývala změnou volné povrchové energie u polypropylenu, tak z následujících studií jsem uvedla vždy hodnoty pouze pro polypropylen. Ve všech uvedených studiích se použila biaxiálně orientovaná polypropylenová fólie.

Ve studii [18] byla použita PP fólie, kterou již výrobce ošetřil koronovým výbojem z jedné strany. V samotné studii se ale dále upravovala koronovým výbojem strana s nižší výchozí volnou povrchovou energií (strana, která nebyla výrobcem fólie ošetřena). Relativní vlhkost vzduchu během pokusů a během skladování byla 50 % a teplota 23 °C. Polymerní fólie byly po ošetření koronou skladovány v rolích. Počáteční volná povrchová energie před úpravou byla

24 mJ/m<sup>2</sup>. Po úpravě koronovým výbojem se volná povrchová energie zvýšila na 35 mJ/m<sup>2</sup>. Efekt nasycení se objevil při dávce korony 50 Wmin/m<sup>2</sup>. Polární i disperzní část se již nadále nezvyšovala a při vyšších dávkách koronového výboje zůstaly jejich hodnoty konstantní. V této studii docházelo k poklesu hodnoty volné povrchové energie až po dobu 140 dní. Časová závislost poklesu polární části byla určena na 12 až 40 dní. V této studii se dále upravovala i polyethylenová a polyethylentereftalátová fólie.

Ve studii [29] se po úpravě koronovým výbojem volná povrchová energie zvýšila na 40 mJ/m<sup>2</sup> a efekt nasycení zaznamenaly již při dávce korony 1,6 Wmin/m<sup>2</sup>. V této studii došlo k ukončení poklesu hodnoty volné povrchové energie už po době 10 dní, ale samotná studie sledovala pokles během skladovacího období trvajícího více než tři měsíce. Použité kapaliny pro měření kontaktních úhlů byly voda, glycerol, formamid, ethylenglykol a trikresylfosfát. Ošetřené vzorky byly skladovány při pokojové teplotě a relativní vlhkosti přibližně 50 %. V této studii porovnávaly metodu úpravy volné povrchové energie koronovým výbojem a plazmou.

Ve studii [30] se po úpravě koronovým výbojem volná povrchová energie zvýšila na 33 mJ/m<sup>2</sup> a efekt nasycení byl zaznamenán při dávce korony 0,83 Wmin/m<sup>2</sup>. Ukončení poklesu hodnoty volné povrchové energie probíhalo už po době 10 dní, ale samotná studie sledovala změnu volné povrchové energie během skladovacího období trvajícího až do doby 100 dní. Mezi měřeními byly vzorky skladovány v oddělených Petriho miskách v kontrolovaném vzdušném prostředí při 50% relativní vlhkosti a teplotě 23 °C. Také měřili, jak se bude měnit volná povrchová energie, když se ihned po úpravě vzorek ponoří na jednu minutu do lázně s deionizovanou vodou, a poté je jednu hodinu sušen na vzduchu. Takto došlo k výraznému poklesu polární složky volné povrchové energie. V této studii se dále upravovala i polyethylenová fólie, a také porovnávaly metodu úpravy volné povrchové energie koronovým výbojem a plazmou.

V knize [31] píše o nutnosti zvýšit volnou povrchovou energii polypropylenu z 30 mJ/m<sup>2</sup> na minimálně 37 mJ/m<sup>2</sup>. Dávka korony pro dosažení efektu nasycení zde byla uvedena 20 Wmin/m<sup>2</sup>. Také je zde uvedeno, že různé studie zaznamenaly ukončení poklesu hodnoty volné povrchové energie v různých dobách (od 6 dní až do 180 dní).

Ve všech studiích byl zaznamenán nejvýraznější pokles volné povrchové energie během prvního týdne po ošetření koronovým výbojem. Podmínky skladování byly ve všech studiích velmi podobné, s relativní vlhkostí 50 % a teplotou kolem 23 °C.

## **2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST**

### **2.1 Polymerní fólie**

Pro testy prováděné v rámci této práce byla použita biaxiálně orientovaná polypropylenová fólie od firmy Radici Film [32]. Její tloušťka je 30  $\mu\text{m}$ . Jedna strana byla upravena pro tisk. Mezi hlavní využití této polymerní fólie patří možnost potisku hlubotiskem i flexotiskem, laminace i s ostatními filmy nebo balení potravin. Před úpravou koronovacím zařízením i před měřením kontaktních úhlů se povrch očistil ethanolem.

### **2.2 Testovací kapaliny**

Kontaktní úhly byly změřeny pomocí čtyř testovacích kapalin (ethylenglykol, formamid, diiodmethan a destilovaná voda). Měření probíhalo při 20 °C.

#### **2.2.1 Ethylenglykol**

Ethylenglykol, který patří mezi sloučeniny zvané glykoly, vyniká svými tepelně vodivými vlastnostmi. Běžně se využívá při výrobě plastových forem, barviv, v potravinářských a farmaceutických procesech, a také jako chladicí prostředek [33]. Jeho molární hmotnost činí 62,07 g/mol. V experimentální části byl použit ethylenglykol o čistotě 99,8 % od firmy Penta.

#### **2.2.2 Formamid**

Jedná se amid kyseliny mravenčí. Je to bezbarvá kapalina s charakteristickým štiplavým zápachem. Používá se jako chemický meziprodukt a ionizační rozpouštědlo, také se používá jako změkčovadlo pro lepidla, gumy a papír [34]. Jeho molární hmotnost je 45,04 g/mol. V experimentální části byl použit formamid o čistotě 99,5 % od firmy Penta.

#### **2.2.3 Dijodmethan**

Dijodmethan je kapalina, která je stabilizována mědí (při vystavení světlu se rozkládá a uvolňuje jód) a má výrazný zápach [35]. Kvůli přítomnosti jódu má nahnědlou barvu. Jeho molární hmotnost je 267,84 g/mol. V experimentální části byl použit diiodmethan o čistotě 99 % od firmy Sigma-Aldrich.

### **2.3 Použité přístroje a vybavení**

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

Koronovací zařízení Lab Treator ASL 400 TUM (Obrázek 9) od firmy Ahlbrandt bylo použito k úpravě volné povrchové energie u polypropylenové fólie. Úprava byla vždy provedena jednostranně. Toto zařízení obsahuje koronovací hlavu (vybavena dvěma keramickými

elektrodami), která se pohybuje nad materiálem. Její rychlost pohybu je možné měnit. Materiál je připevněný ke spodní hliníkové desce lepicí páskou. Vznikající ozón byl v celém průběhu měření odsáván. Po dokončení měření byla hliníková deska očištěna ethanolem.

Výkon korony byl nastaven na hodnotu 800 W a rychlost pohybu koronovací hlavy nad materiálem byla nastavena na 10 m/min.



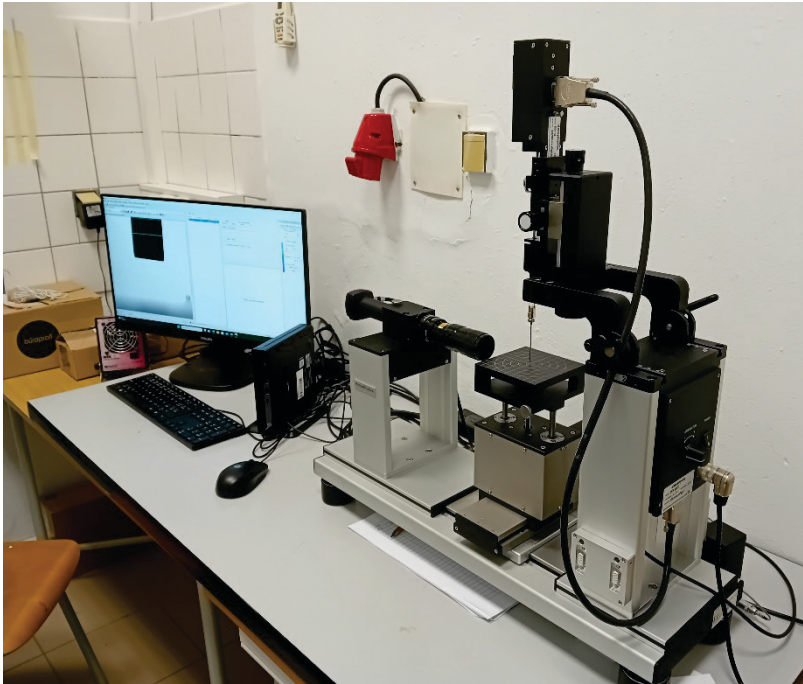
Obrázek 9: Koronovací zařízení ASL 400 TUM

### 2.3.2 Goniometr OCA 50EC a software SCA 20

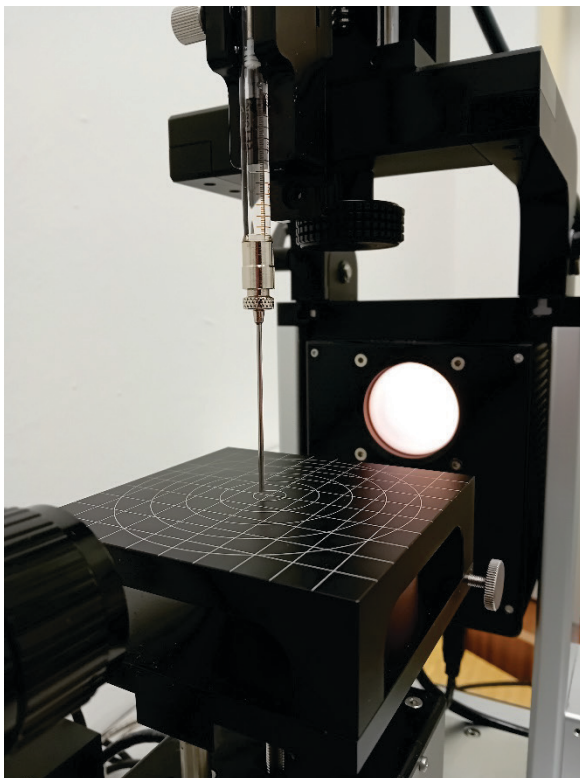
Goniometr OCA 50EC (Obrázek 10) byl použit pro měření kontaktních úhlů k následnému vypočítání volné povrchové energie. K měření se používaly stříkačky Hamilton 500  $\mu\text{l}$  (každá kapalina měla svoji stříkačku), které se upevňovaly do goniometru (Obrázek 11). Jejich zafixování, výška umístění a poloha se upravuje ručně pomocí nastavitelných šroubů.

Ovládání goniometru je pomocí počítače a softwaru SCA 20, ve kterém se nastavuje výška stolku goniometru se vzorkem materiálu, nastavení typu stříkačky, metoda měření kapky, tloušťka použité jehly, jak se bude kontaktní úhel snímat a objem jedné kapky. Výsledný obraz kapky zobrazovaný v softwaru je možné doostřit na kameře a intenzitu světelného zdroje je možné upravit pomocí ovladače na goniometru.

Metoda měření byla pomocí přisedlé kapky, objem kapky byl nastaven na 2  $\mu\text{l}$ , tloušťka použité jehly 1,6 mm a pro výpočet kontaktního úhlu jsme nastavily variantu eliptického fitování (ellipse fitting).



Obrázek 10: Goniometr OCA 50EC připojený k počítači se spuštěným softwarem SCA 20



Obrázek 11: Stříkačka Hamilton 500  $\mu\text{l}$  upevněná v goniometru

## 2.4 Postup měření

Cílem této bakalářské práce bylo změřit volnou povrchovou energii polypropylenové fólie včetně její polární a disperzní složky a jak se její hodnota mění v čase po úpravě korunou. Pro stanovení byla použita metoda podle Owense a Wendta (kapitola 1.5.2). Stanovení bylo provedeno pro PP fólii, jejíž volná povrchová energie byla upravena koronovým výbojem a také pro vzorky, které nebyly upravené. Během měření se volná povrchová energie proměřila také pomocí dynových per. Tyto hodnoty byly brány jako kontrola správnosti měření pomocí standartních kapalin. Před každým měřením i před úpravou byla PP fólie očištěna ethanolem.

Měření bylo prováděno při 20 °C. Z role PP fólie byly nastříhané vzorky o velikosti cca 30×10 cm. Před měřením na goniometru OCA 50 EC byly tyto vzorky nastříhané na menší části o velikosti cca 1×10 cm. Vzorky byly po úpravě skladovány na sobě v čiré eurosložce v uzavřené zásuvce. Vlhkost se během měření ani během skladování neupravovala a vzorky byly skladovány za pokojové teploty.

Před úpravou polypropylenové fólie byly proměřené její obě strany a takto se určila její vrchní strana (s vyšší volnou povrchovou energií) a spodní strana (s nižší volnou povrchovou energií). Polypropylenová fólie byla upravená pomocí koronovacího zařízení z vrchní i spodní strany. Koronovací zařízení ASL 400 TUM použité k úpravě mělo nastavený výkon 800 W a rychlost pohybu koronovací hlavy byla 10 m/min. První měření (1 až 3) byly provedeny u PP fólie, nad kterou projela koronovací hlava jednou tam a zpátky. U dalších měření byly průjezdy koronovací hlavou nad materiálem zvýšeny na dvakrát (tam a zpět) a třikrát (tam a zpět).

Po očištění ethanolem a jeho odpaření byly vzorky přilepené pomocí lepicí pásky po celém obvodu PP fólie k pracovnímu stolu koronovacího zařízení (pracovní plocha je na stole vyznačena drážkami). Poté proběhla úprava materiálu pomocí koronového výboje. Během každého průjezdu koronovací hlavy nad materiálem bylo zkontrolováno, zda se PP fólie nikde neodlepí, aby nedošlo k jejímu odtržení a přilepení ke koronovací hlavě. Po ošetření se vzorky odlepily od plochy pracovního stolu a následně proběhlo měření vybraných vzorků. Zbylé vzorky se položily na sebe a uschovaly k pozdějšímu měření.

Kapaliny byly dávkovány na materiál pomocí Hamiltonových stříkaček, každá ze čtyř kapalin se měřila v jiné stříkačce s jinou jehlou pro zamezení jejich kontaminace. Před každým použitím se nejprve do stříkačky natáhlo malé množství kapaliny pro propláchnutí její jehly. Toto byl další krok k zabránění kontaminace, a tak i zkrácení naměřených výsledků kontaktních úhlů.

Hamiltonova stříkačka byla umístěna v držáku goniometru OCA 50 EC a v softwaru SCA20 byla nastavena hodnota objemu jedné kapky na 2  $\mu\text{l}$ . Před započítím měření byla provedena kalibrace, nastavení polohy stolku s měřenou PP fólií a zkontrolované parametry měření.

Menší části vzorků polypropylenové fólie (velikost cca  $1 \times 10$  cm) byly postupně vkládány na stolek goniometru OCA 50 EC pod hrot Hamiltonovy stříkačky. Kontaktní úhly testovacích kapalin byly měřeny pomocí metody přisedlé kapky (kapitola 1.4.2.2). Kapalina byla vytlačována ze stříkačky automaticky pomocí softwaru SCA20. Vytlačené množství kapaliny se pohybem stříkačky ke vzorku a jeho následným dotykem s materiálem a vyzvednutím jehly nahoru oddělilo od stříkačky a vytvořilo kapku na povrchu PP fólie. Po nanesení kapky se počkalo na její ustálení (jedna až dvě sekundy) a následně se spustil časový záznam kapky (zachyceno 12 snímků kapky s krokem jedna sekunda). U těchto snímků následně software změří pravý a levý kontaktní úhel a vypočítá jeho průměrnou hodnotu. Tato data se následně vložila do připraveného excelovského souboru pro další vyhodnocení. Pro každou kapalinu a daný materiál se nasnímalo vždy 5 kapek. V optimálním případě by měly mít všechny kapky podobnou velikost.

Jednou kapalinou se vždy proměřily všechny vzorky a až poté se přešlo na měření další kapalinou. Při každé výměně stříkačky s kapalinou se provedla znovu kalibrace. Zbylé testovací kapaliny ze stříkačky byly dány do připravených lahvíček na odpadní materiál.

V excelu se již prováděl samotný výpočet volné povrchové energie pomocí metody Owense a Wendta. Pro každou kapku byla z 12 hodnot kontaktních úhlů vypočítána jedna průměrná hodnota. Následně se z těchto průměrů vypočítal společný průměr kontaktního úhlu všech pěti kapek, tato hodnota se dále používala pro výpočet volné povrchové energie. Toto bylo vypočítáno u všech kapalin a u všech vzorků. Do Rovnice 5 byly následně dosazeny hodnoty kontaktního úhlu a tabelované hodnoty povrchového napětí používaných kapalin za x a y souřadnice (Tabulka 1) (Obrázek 12). Tyto hodnoty byly poté vyneseny do grafu a proloženy lineární spojnici trendu. Člen *a* značí odmocninu z hodnoty polární složky volné povrchové energie a člen *b* značí odmocninu z hodnoty disperzní složky. Sečtením obou složek byla získána výsledná hodnota volné povrchové energie.

$$\underbrace{\left(\frac{1+\cos\theta}{2}\right) \cdot (\gamma_{lg}^p / \gamma_{lg}^d)^{0,5}}_y = \underbrace{(\gamma_{sg}^p)^{0,5}}_a \cdot \underbrace{(\gamma_{lg}^p / \gamma_{lg}^d)^{0,5}}_x + \underbrace{(\gamma_{sg}^d)^{0,5}}_b$$

Obrázek 12: Rovnice přímky pro výpočet polární ( $\gamma_{sg}^p$ ) a disperzní složky ( $\gamma_{sg}^d$ ) volné povrchové energie metodou Owens-Wendt

## 2.5 Výsledky a diskuse

Volná povrchová energie polypropylenové fólie byla určována na základě kontaktních úhlů čtyř vybraných kapalin (destilovaná voda, ethylenglykol, formamid a diiodmethan). Měření byla rozdělena do dvou kategorií: před úpravou PP fólie koronovým výbojem a po úpravě, která změnila její volnou povrchovou energii, kde se sledoval i vliv času na pokles této energie.

### 2.5.1 Měření polypropylenové fólie před úpravou koronovým výbojem

Polypropylenová (PP) fólie byla před úpravou koronovým výbojem proměřena celkem šestkrát. První tři měření byly pouze testovací. Prvním měření sloužilo k seznámení s měřicím přístrojem OCA 50, nastavení parametrů v softwaru SCA20 a práci s mikrostříkačkou a testovacími kapalinami. Ve druhém měření byly použity kapaliny, které se následně používaly pro všechna další měření (s výjimkou diiodmethanu, který byl později nahrazen novým). Třetí měření sloužilo ke sjednocení objemu kapek. Při těchto měřeních byla také měřena volná povrchová energie polyethyltereftalátové (PET) fólie, která má vyšší volnou povrchovou energii než polypropylenová fólie. Tento krok umožnil optimalizaci objemu kapky, jelikož při vysoké hodnotě volné povrchové energie PET fólie a nízkém povrchovém napětí ethylenglykolu se kapka s objemem cca 3  $\mu\text{l}$  (původní nastavený objem) nevešla do okna softwaru SCA20, zatímco 2  $\mu\text{l}$  byla již dostatečně malá.

První měření neupravené PP fólie uváděné v této práci bylo provedeno 8. 3. 2024. Při tomto měření byly použity tři vzorky pro vrchní stranu a tři vzorky pro spodní stranu fólie. Tabulka 3 a 4 uvádí vypočítané průměrné hodnoty tří vzorků volné povrchové energie a hodnoty jejich polárních a disperzních složek. V prvním sloupci se nachází datum, kdy bylo dané měření uskutečněno. Ve druhém sloupci jsou uvedeny hodnoty polární složky volné povrchové energie ( $\sigma_s^p$ ), ve čtvrtém sloupci jsou hodnoty disperzní složky volné povrchové energie ( $\sigma_s^d$ ). Šestý sloupec obsahuje průměrné hodnoty volné povrchové energie měřených vzorků ( $\sigma_s$ ), zatímco třetí, pátý a sedmý sloupec udávají výběrovou směrodatnou odchylku (s) jednotlivých měření volné povrchové energie.

Tabulka 3: Hodnoty měření volné povrchové energie neupravené PP fólie (vrchní strana)

den měření	vrchní strana					
	$\sigma_s^p$ (mJ/m <sup>2</sup> )	s	$\sigma_s^d$ (mJ/m <sup>2</sup> )	s	$\sigma_s$ (mJ/m <sup>2</sup> )	s
8. 3.	4,26	0,51	26,22	0,83	30,48	0,43
5. 4.	4,21	0,28	25,98	0,42	30,19	0,67
9. 5.	4,14	0,06	25,22	0,54	29,36	0,60

Tabulka 4: Hodnoty měření volné povrchové energie neupravené PP fólie (spodní strana)

den měření	spodní strana					
	$\sigma_s^p$ (mJ/m <sup>2</sup> )	s	$\sigma_s^d$ (mJ/m <sup>2</sup> )	s	$\sigma_s$ (mJ/m <sup>2</sup> )	s
8. 3.	1,90	0,42	22,43	0,76	24,33	0,34
5. 4.	1,73	0,20	22,44	0,20	24,16	0,48
9. 5.	1,62	0,14	22,70	0,14	24,32	0,12

Z hodnot v Tabulce 3 a 4 lze vidět, že vrchní strana PP fólie má na počátku vyšší volnou povrchovou energii než spodní strana (průměrný rozdíl je 5,73 mJ/m<sup>2</sup>). Druhé měření volné povrchové energie u neupravené PP fólie bylo provedeno 5. 4. 2024 a třetí měření 9. 5. 2024. Zde byly také použity tři vzorky pro vrchní stranu a tři vzorky pro spodní stranu. Hodnoty volné povrchové energie při obou měřeních mírně klesly (vrchní strana) ve srovnání s prvním měřením. Nicméně, vzhledem k hodnotě směrodatné odchylky lze tento rozdíl považovat za nevýznamný.

Měření probíhalo vždy jednou měsíčně až do konce celkového měření experimentální části. Během měření se hodnota volné povrchové energie vrchní tak spodní strany od sebe příliš nelišila (rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou u vrchní strany činí 1,12 mJ/m<sup>2</sup> a u spodní strany 0,17 mJ/m<sup>2</sup>). Hodnoty polární i disperzní složky u vrchní strany PP fólie jsou vyšší než hodnoty u spodní strany fólie, což je dáno úpravou vrchní strany výrobcem PP fólie.

Všechny hodnoty volných povrchových energií jednotlivých vzorků i s jejich polárními a disperzními složkami jsou uvedeny v Příloze 1.

### 2.5.2 Měření polypropylenové fólie po úpravě koronovým výbojem

Další měření byla prováděna na PP fóliích, které byly upravené koronovým výbojem. Celkem bylo uskutečněno sedm měření. U těchto sad se pak opakovaně měřila volná povrchová energie v různých časových intervalech po koronování. Úprava PP fólií probíhala v následujícím pořadí: dvě sady PP fólií byly upraveny jedním průjezdem koronovací hlavy, vzorky s vrchní vrstvou upravenou třemi průjezdy, vzorky s vrchní vrstvou upravenou dvěma průjezdy, vzorky se spodní vrstvou upravenou třemi průjezdy, a nakonec vzorky se spodní vrstvou upravenou dvěma průjezdy. Pro lepší přehlednost jsem výsledky spojila do sad, přičemž každá sada obsahuje výsledky pro vrchní i spodní stranu PP fólie, a seřadila je podle stupně úpravy od nejmenší úpravy (jeden průjezd) po největší úpravu (tři průjezdy).

### 2.5.2.1 Měření 1. sady PP fólií upravené jedním průjezdem koronovací hlavy

První měření upravené PP fólie bylo provedeno 19. 2. 2024. Při tomto měření byla PP fólie upravena v koronovacím zařízení s nastaveným výkonem 800 W a vzorky byly upraveny jedním průjezdem koronovací hlavy tam a zpět. Tabulka 5 obsahuje průměrné hodnoty volné povrchové energie z jednotlivých měření pro vrchní stranu a Tabulka 6 obsahuje průměrné hodnoty volné povrchové energie pro spodní stranu upravené PP fólie. Celkem bylo upraveno 16 vzorků, z toho 8 vzorků z vrchní strany a 8 vzorků ze spodní strany. Jeden vzorek byl vždy použit pro jedno celkové měření. V prvním sloupci se nachází datum, kdy bylo dané měření uskutečněno. Ve druhém sloupci je uvedeno pro větší přehlednost čas od úpravy korunou. Při měření první sady probíhalo měření vrchní i spodní strany PP fólie souběžně. Vzhledem k náročnosti (jedno měření všech vzorků trvalo cca 3,5 hod.) od toho bylo dále upuštěno a u dalších sérií probíhalo měření vrchní a spodní strany odděleně. Toto umožnilo dále zvýšit počet měření v den, kdy probíhalo koronování vzorků.

Tabulka 5: Hodnoty měření volné povrchové energie první sady PP fólií (vrchní strana)

den měření	čas po koruně	vrchní strana					
		$\sigma_s^p$ (mJ/m <sup>2</sup> )	s	$\sigma_s^d$ (mJ/m <sup>2</sup> )	s	$\sigma_s$ (mJ/m <sup>2</sup> )	s
19. 2.	0 h	21,09	1,21	23,45	0,65	44,54	0,65
	3,5 h	3,55	0,16	32,97	0,26	36,52	0,34
20. 2.	1 den	5,74	0,07	27,07	0,39	32,81	0,44
21. 2.	2 dny	5,92	0,32	26,83	0,72	32,75	0,56
23. 2.	4 dny	5,84	0,17	29,76	1,15	35,60	0,99
28. 2.	9 dnů	6,03	0,36	27,86	0,41	33,89	0,05
8. 3.	18 dnů	4,45	0,55	28,72	0,27	33,17	0,30
5. 4.	46 dnů	4,37	0,23	26,08	0,11	30,45	0,14

Tabulka 6: Hodnoty měření volné povrchové energie první sady PP fólií (spodní strana)

den měření	čas po koruně	spodní strana					
		$\sigma_s^p$ (mJ/m <sup>2</sup> )	s	$\sigma_s^d$ (mJ/m <sup>2</sup> )	s	$\sigma_s$ (mJ/m <sup>2</sup> )	s
19. 2.	0 h	13,17	1,54	23,95	0,60	37,12	1,50
	3,5 h	4,90	0,12	25,16	0,57	30,06	0,68
20. 2.	1 den	8,83	2,21	20,97	1,82	29,80	0,64
21. 2.	2 dny	3,91	0,80	24,46	0,78	28,37	0,61
23. 2.	4 dny	5,25	0,39	25,18	1,12	30,43	1,08
28. 2.	9 dnů	4,25	0,31	28,54	0,60	32,79	0,36
8. 3.	18 dnů	3,60	0,14	25,79	0,97	29,38	1,11
5. 4.	46 dnů	3,43	0,51	24,83	0,75	28,27	0,27

Volná povrchová energie vzorků u měření ihned po úpravě korunou výrazně stoupla oproti hodnotám naměřených u neupravených fólií. Nárůst byl u vrchní strany o 14,5 mJ/m<sup>2</sup> a u spodní strany byl 12,8 mJ/m<sup>2</sup>. Měření po 3,5 hodinách ukázalo výrazný pokles volné povrchové energie. U vrchní strany byl pokles o 8 mJ/m<sup>2</sup> a u spodní strany byl pokles o 7 mJ/m<sup>2</sup>. V dalších dnech se pokles zpomalil. Měření probíhalo až do 46 dnů od úpravy, kdy se hodnota volné povrchové energie u vrchní strany vrátila na výchozí hodnotu fólie bez úpravy. U spodní strany byla konečná hodnota volné povrchové energie o cca 4 mJ/m<sup>2</sup> vyšší než výchozí hodnota neupravené fólie.

Rozdíly v ustálení poklesu volné povrchové energie (její kolísání) mohly být také způsobeny změnou diiodmethanu během testování. Od 19. 2. do 21. 2. byl používán původní diiodmethan určený pro měření bakalářských a diplomových prací až do jeho vypotřebování. 23. 2. byl použit diiodmethan, který je volně přístupný pro měření v laboratořích a od 28. 2. se měřilo již z nově zakoupeným diiodmethanem.

Všechny hodnoty volných povrchových energií jednotlivých testovaných vzorků u první sady i s jejich polárními a disperzními složkami jsou uvedeny v Příloze 2 pro vrchní stranu a v Příloze 3 pro spodní stranu.

#### **2.5.2.2 Měření 2. sady PP fólií upravené jedním průjezdem koronovací hlavy**

Druhé měření upravené vrchní strany PP fólie bylo provedeno 26. 2. 2024 a měření upravené spodní strany bylo provedeno 4. 3. 2024. Při tomto měření byly vzorky upraveny jedním průjezdem koronovací hlavy tam a zpět. Tabulka 7 obsahuje průměrné hodnoty volné povrchové energie z jednotlivých měření pro vrchní stranu upravené PP fólie a Tabulka 8 obsahuje průměrné hodnoty volné povrchové energie pro spodní stranu. Celkem bylo upraveno 14 vzorků, z toho 7 vzorků z vrchní strany a 7 vzorků ze spodní strany. Toto měření bylo kontrolní pro ověření správnosti první sady měření. Díky měření pouze jedné strany, bylo možné provést v den úpravy korunou měření i po dvou a pěti hodinách (jedno celkové měření trvalo cca 1,5 hodiny).

Tabulka 7: Hodnoty měření volné povrchové energie druhé sady PP fólií (vrchní strana)

den měření	čas po koruně	vrchní strana					
		$\sigma_s^p$ (mJ/m <sup>2</sup> )	s	$\sigma_s^d$ (mJ/m <sup>2</sup> )	s	$\sigma_s$ (mJ/m <sup>2</sup> )	s
26. 2.	0 h	12,24	0,20	30,23	0,75	42,46	0,55
	2 h	6,21	0,44	28,14	0,58	34,35	0,96
	5 h	5,09	0,38	29,33	0,64	34,42	0,31
27. 2.	1 den	4,89	0,57	32,98	0,53	37,87	0,39
28. 2.	2 dny	6,89	0,19	28,08	0,27	34,97	0,45
4. 3.	7 dnů	6,80	1,37	27,55	1,00	34,35	0,41
6. 3.	9 dnů	5,97	0,09	29,15	0,27	35,12	0,31

Tabulka 8: Hodnoty měření volné povrchové energie druhé sady PP fólií (spodní strana)

den měření	čas po koruně	spodní strana					
		$\sigma_s^p$ (mJ/m <sup>2</sup> )	s	$\sigma_s^d$ (mJ/m <sup>2</sup> )	s	$\sigma_s$ (mJ/m <sup>2</sup> )	s
26. 2.	0 h	8,74	0,16	28,43	0,21	37,17	0,17
	2 h	6,40	0,47	27,41	0,33	33,81	0,15
	5 h	4,42	0,32	25,93	0,32	30,35	0,04
27. 2.	1 den	8,54	0,44	26,06	0,25	34,60	0,36
28. 2.	2 dny	5,11	0,23	27,54	0,37	32,65	0,20
4. 3.	4 dny	3,97	0,59	27,77	0,82	31,75	0,48
6. 3.	18 dnů	3,94	0,28	24,21	0,22	28,15	0,29

Volná povrchová energie vzorků u měření ihned po úpravě korunou opět výrazně stoupla oproti hodnotám naměřených u neupravených fóliích, ale u vrchní strany o něco méně než v první sadě měření. U vrchní strany byl zaznamenán nárůst o 12,5 mJ/m<sup>2</sup> (o 2 mJ/m<sup>2</sup> méně než u první sady) a u spodní strany byl 12,9 mJ/m<sup>2</sup>. Měření po 2 hodinách ukázalo výrazný pokles volné povrchové energie. U vrchní strany byl pokles o 8,1 mJ/m<sup>2</sup> a u spodní strany byl pokles o 3,4 mJ/m<sup>2</sup>. Zde byl pokles u spodní strany menší, než v první sadě. V následujících dnech však došlo také ke zpomalení poklesu. Měření probíhalo pouze do 9 dnů od úpravy u vrchní strany a do 18 dnů od úpravy u spodní strany. U vrchní strany byla konečná hodnota volné povrchové energie o cca 5 mJ/m<sup>2</sup> vyšší než výchozí hodnota neupravené fólie a u spodní strany byla konečná hodnota o cca 4 mJ/m<sup>2</sup> vyšší než výchozí hodnota neupravené fólie.

Rozdíly v ustálení poklesu volné povrchové energie mohly být také způsobeny změnou diiodmethanu během testování. 26. 2. byl použit diiodmethan, který je volně přístupný pro měření v laboratořích a od 27. 2. se měřilo již z nově zakoupeným diiodmethanem. U měření spodní strany byla již celou dobu měření použit nově zakoupený diiodmethan.

Všechny hodnoty volných povrchových energií jednotlivých testovaných vzorků u druhé sady i s jejich polárními a disperzními složkami jsou uvedeny v Příloze 4 pro vrchní stranu a v Příloze 5 pro spodní stranu.

### 2.5.2.3 Měření 3. sady PP fólií upravené dvěma průjezdy koronovací hlavy

Třetí měření upravené vrchní strany PP fólie bylo provedeno 25. 3. 2024 a měření upravené spodní strany bylo provedeno 15. 4. 2024. Při tomto měření byly vzorky upraveny dvěma průjezdy koronovací hlavy tam a zpět. Tabulka 9 obsahuje průměrné hodnoty volné povrchové energie z jednotlivých měření pro vrchní stranu upravené PP fólie a Tabulka 10 obsahuje průměrné hodnoty volné povrchové energie pro spodní stranu. Celkem bylo upraveno 16 vzorků, z toho 8 vzorků z vrchní strany a 8 vzorků ze spodní strany. V tomto měření se zjišťovalo, zda se hodnota volné povrchové energie PP fólie zvýší zdvojnásobením dávky korony.

Tabulka 9: Hodnoty měření volné povrchové energie třetí sady PP fólií (vrchní strana)

den měření	čas po koruně	vrchní strana					
		$\sigma_s^p$ (mJ/m <sup>2</sup> )	s	$\sigma_s^d$ (mJ/m <sup>2</sup> )	s	$\sigma_s$ (mJ/m <sup>2</sup> )	s
25. 3.	0 h	7,82	1,62	29,23	0,98	37,05	0,69
	2 h	7,10	0,48	27,67	0,26	34,77	0,26
	5 h	6,14	0,70	26,13	0,55	32,27	0,65
26. 3.	1 den	5,15	0,30	27,82	0,29	32,97	0,13
27. 3.	2 dny	5,19	0,05	27,72	0,08	32,91	0,05
3. 4.	9 dnů	5,02	0,15	27,79	0,46	32,81	0,42
10. 4.	16 dnů	5,38	0,15	27,57	0,36	32,94	0,22
24. 4.	30 dnů	4,07	0,23	28,46	0,52	32,53	0,29

Tabulka 10: Hodnoty měření volné povrchové energie třetí sady PP fólií (spodní strana)

den měření	čas po koruně	spodní strana					
		$\sigma_s^p$ (mJ/m <sup>2</sup> )	s	$\sigma_s^d$ (mJ/m <sup>2</sup> )	s	$\sigma_s$ (mJ/m <sup>2</sup> )	s
15. 4.	0 h	4,49	0,87	31,90	0,43	36,38	0,87
	2 h	5,90	0,93	28,04	0,55	33,95	0,38
	5 h	4,53	0,07	29,55	0,31	34,08	0,25
16. 4.	1 den	4,93	0,60	27,55	0,14	32,49	0,56
17. 4.	2 dny	4,23	0,23	28,79	0,22	33,02	0,14
24. 4.	9 dnů	4,33	0,14	27,18	0,42	31,51	0,29
3. 5.	18 dnů	3,07	0,03	27,27	0,52	30,34	0,54
15. 5.	30 dnů	2,82	0,22	26,20	0,08	29,02	0,20

Volná povrchová energie u měření prováděných ihned po úpravě korunou stoupla oproti hodnotám naměřených u neupravených fóliích, ale u vrchní strany byl pozorován nižší nárůst

než v předchozích měřeních. U vrchní strany byl zaznamenán nárůst o  $7 \text{ mJ/m}^2$  (přibližně o polovinu méně než u první sady) a u spodní strany byl  $12,1 \text{ mJ/m}^2$  (téměř totožný s předchozími měřeními). Měření po 2 hodinách opět ukázalo výrazný pokles volné povrchové energie. U vrchní i spodní strany byl pokles cca  $3 \text{ mJ/m}^2$ . V následujících dnech došlo také ke zpomalení změny poklesu volné povrchové energie. Měření probíhalo u obou stran 30 dnů. U vrchní strany byla konečná hodnota volné povrchové energie o cca  $2,5 \text{ mJ/m}^2$  vyšší než výchozí hodnota neupravené fólie a u spodní strany byla konečná hodnota o cca  $4,7 \text{ mJ/m}^2$  vyšší než výchozí hodnota neupravené fólie.

Z měření vyplývá, že na spodní stranu zvýšená dávka korony měla minimální vliv (hodnota volné povrchové energie byla podobná jako hodnoty volné povrchové energie u sad upravené jedním průjezdem koronovací hlavy). Na vrchní stranu zvýšená dávka korony měla opačný jev, než se předpokládalo (hodnota volné povrchové energie byla nižší než u sad upravené jedním průjezdem koronovací hlavy). Hodnota výsledné volné povrchové energie po úpravě dvěma průjezdy tak byla u obou stran téměř totožná (rozdíl menší než  $1 \text{ mJ/m}^2$ ).

Všechny hodnoty volných povrchových energií jednotlivých testovaných vzorků u třetí sady i s jejich polárními a disperzními složkami jsou uvedeny v Příloze 6 pro vrchní stranu a v Příloze 7 pro spodní stranu.

#### **2.5.2.4 Měření 4. sady PP fólií upravené třemi průjezdy koronovací hlavy**

Čtvrté a poslední měření upravené vrchní strany PP fólie bylo provedeno 18. 3. 2024 a měření upravené spodní strany bylo provedeno 8. 4. 2024. Při tomto měření byly vzorky upraveny třemi průjezdy koronovací hlavy tam a zpět. Tabulka 11 obsahuje průměrné hodnoty volné povrchové energie z jednotlivých měření pro vrchní stranu upravené PP fólie a Tabulka 12 obsahuje průměrné hodnoty volné povrchové energie pro spodní stranu. Celkem bylo upraveno 17 vzorků, z toho 9 vzorků z vrchní strany a 8 vzorků ze spodní strany. V tomto měření se zjišťovalo, zda se hodnota volné povrchové energie PP fólie zvýší ztrojnásobením dávky korony. Toto měření proběhlo časově před úpravou, kde se dávka zdvojnásobila (měření třetí sady).

Tabulka 11: Hodnoty měření volné povrchové energie čtvrté sady PP fólií (vrchní strana)

den měření	čas po koruně	vrchní strana					
		$\sigma_s^p$ (mJ/m <sup>2</sup> )	s	$\sigma_s^d$ (mJ/m <sup>2</sup> )	s	$\sigma_s$ (mJ/m <sup>2</sup> )	s
18. 3.	0 h	12,52	2,28	26,23	1,95	38,75	0,47
	2 h	11,33	1,38	25,11	0,64	36,44	0,75
	5 h	10,40	0,56	25,43	0,16	35,83	0,43
19. 3.	1 den	5,86	0,48	26,84	0,86	32,71	0,47
20. 3.	2 dny	4,22	0,13	28,60	0,06	32,82	0,15
22. 3.	4 dny	4,52	0,41	27,16	0,45	31,69	0,17
27. 3.	9 dnů	4,81	0,26	28,25	0,04	33,06	0,29
5. 4.	18 dnů	4,28	0,24	28,45	0,71	32,72	0,93
17. 4.	30 dnů	4,18	0,06	28,02	0,37	32,20	0,31

Tabulka 12: Hodnoty měření volné povrchové energie čtvrté sady PP fólií (spodní strana)

den měření	čas po koruně	spodní strana					
		$\sigma_s^p$ (mJ/m <sup>2</sup> )	s	$\sigma_s^d$ (mJ/m <sup>2</sup> )	s	$\sigma_s$ (mJ/m <sup>2</sup> )	s
8. 4.	0 h	6,91	0,31	30,11	0,40	37,02	0,09
	2 h	6,92	0,35	27,93	0,59	34,85	0,37
	5 h	4,31	0,20	28,61	0,17	32,91	0,31
9. 4.	1 den	3,89	0,85	26,54	0,79	30,43	0,19
10. 4.	2 dny	3,85	0,09	28,74	0,24	32,59	0,16
17. 4.	9 dnů	3,93	0,20	28,84	0,15	32,77	0,12
24. 4.	16 dnů	5,33	0,18	27,17	0,43	32,51	0,28
9. 5.	31 dnů	2,78	0,03	26,31	0,22	29,09	0,25

Volná povrchová energie u měření ihned po úpravě stoupla oproti hodnotám naměřených u neupravených fóliích, ale u vrchní strany byl pozorován nižší nárůst než v předchozích měřeních u jednoho průjezdu koronovací hlavy. U vrchní strany byl zaznamenán nárůst o 8,7 mJ/m<sup>2</sup> (méně než u první sady, ale trochu více než u třetí sady) a u spodní strany byl 12,7 mJ/m<sup>2</sup> (téměř totožný s předchozími měřeními). Měření po 2 hodinách ukázalo menší pokles volné povrchové energie než v první sadě. U vrchní i spodní strany byl pokles cca 2,2 mJ/m<sup>2</sup>. Měření probíhalo u vrchní strany 30 dnů a u spodní strany 31 dnů. U vrchní strany byla konečná hodnota volné povrchové energie o cca 2,2 mJ/m<sup>2</sup> vyšší než výchozí hodnota neupravené fólie a u spodní strany byla konečná hodnota o cca 4,8 mJ/m<sup>2</sup> vyšší než výchozí hodnota neupravené fólie. Z porovnání konečných stavů volné povrchové energie třetí a čtvrté sady (dva a tři průjezdy) vyplývá, že se hodnoty polární, disperzní i celkové volné povrchové energie po 30 dnech od korunování ustálily na velmi podobných hodnotách s minimálním rozdílem.

Dále z měření vyplynulo, že na spodní stranu ztrojnásobená dávka korony neměla žádný vliv (hodnota volné povrchové energie byla podobná jako hodnoty volné povrchové energie u sad upravené jedním a dvěma průjezdy koronovací hlavy), zatímco na vrchní stranu zvýšená dávka korony působila opačně, než se předpokládalo (hodnota volné povrchové energie byla nižší než u sad upravené jedním průjezdem koronovací hlavy, ale podobná jako hodnota volné povrchové energie u sady upravené dvěma průjezdy koronovací hlavy). Hodnota výsledné volné povrchové energie po úpravě třemi průjezdy tak byla u obou stran téměř totožná.

Všechny hodnoty volných povrchových energií jednotlivých testovaných vzorků u čtvrté sady i s jejich polárními a disperzními složkami jsou uvedeny v Příloze 8 pro vrchní stranu a v Příloze 9 pro spodní stranu.

### **2.5.3 Porovnání oproti podobným studiím úpravy volné povrchové energie**

Výchozí průměrné hodnoty volné povrchové energie neupravené polypropylenové fólie v této práci byly pro vrchní stranu 30,01 mJ/m<sup>2</sup> a pro spodní stranu 24,27 mJ/m<sup>2</sup>. Hodnota volné povrchové energie pro spodní stranu byla nižší než hodnoty uváděné v literatuře s hodnotami 29,4–30,1 mJ/m<sup>2</sup> [6], ale byla podobná s hodnotou uváděnou ve zdroji [18].

Nejvyšší hodnota volné povrchové energie upravené korunou byla naměřena u první sady u vrchní strany fólie a to 44,54 mJ/m<sup>2</sup>, u druhé sady byla tato hodnota 42,46 mJ/m<sup>2</sup>. Ve srovnání se zdroji [18] a [30] je tato hodnota vyšší a odpovídá spíše hodnotám uváděným ve zdroji [29]. Hodnota volné povrchové energie u spodní strany se pohybovala okolo 37 mJ/m<sup>2</sup>, což odpovídá hodnotě, která je uvedena v knize [31], jako minimální možná hodnota pro kvalitní potisk.

Ve všech studiích byl největší pokles volné povrchové energie zaznamenán během prvního týdne po ošetření koronovým výbojem. V práci byl však největší pokles zaznamenán již během prvního dne po ošetření koronovým výbojem. Poté se pokles zpomalil, což je v souladu s ostatními studiemi. Ukončení poklesu volné povrchové energie bylo v této práci pozorováno po 46 dnech od úpravy korunou u první sady upravené jedním průjezdem, což je srovnatelné s dobou uvedenou ve studii [18]. U sad, které byly vystaveny větší koronovací dávce (dva a tři průjezdy), trvalo měření pouze jeden měsíc a za tuto dobu se volná povrchová energie PP na výchozí hodnotu nedostala. Kniha [31] však uvádí, že různé studie se v této době liší, přičemž rozmezí ukončení poklesu se pohybuje od 6 do 180 dní.

### 3 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo zkoumat, jak se volná povrchová energie polypropylenové fólie mění v čase po úpravě koronovým výbojem. Měření bylo realizováno pomocí kontaktních úhlů čtyř kapalin (destilovaná voda, ethylenglykol, formamid a diiodmethan) a následného výpočtu metodou podle Owense a Wendta. Kontaktní úhly byly měřené pomocí goniometru OCA 50 EC. Úprava povrchu polypropylenové fólie pomocí koronového výboje probíhala na koronovacím zařízení ASL 400 TUM s nastaveným výkonem 800 W a rychlostí pohybu koronovací hlavy 10 m/min.

Průměrná výchozí hodnota volné povrchové energie vrchní strany PP fólie byla  $30,0 \text{ mJ/m}^2$  (polární část  $4,2 \text{ mJ/m}^2$  a disperzní část  $25,8 \text{ mJ/m}^2$ ) a spodní strany byla  $24,3 \text{ mJ/m}^2$  (polární část  $1,8 \text{ mJ/m}^2$  a disperzní část  $22,5 \text{ mJ/m}^2$ ). Úpravou došlo ke zvýšení volné povrchové energie, nejvíce ke zvýšení polární části volné povrchové energie. Největší hodnoty volné povrchové energie bylo dosaženo u vrchní strany při jednom průjezdu koronovací hlavy, a to na hodnotu  $44,5 \text{ mJ/m}^2$  u první sady (polární část  $21,1 \text{ mJ/m}^2$  a disperzní část  $23,5 \text{ mJ/m}^2$ ) a  $42,5 \text{ mJ/m}^2$  u druhé sady (polární část  $12,2 \text{ mJ/m}^2$  a disperzní část  $30,2 \text{ mJ/m}^2$ ). U spodní strany se nárůst volné povrchové energie u všech měření (jedním, dvěma i třemi průjezdy koronovací hlavy) pohyboval okolo  $12 \text{ mJ/m}^2$ , zatímco u vrchní strany byl pozorován menší nárůst volné povrchové energie při dvou průjezdech koronovací hlavy (nárůst přibližně o  $7 \text{ mJ/m}^2$ ) a třech průjezdech koronovací hlavy (nárůst přibližně o  $8 \text{ mJ/m}^2$ ).

Efekt nasycení byl pozorován u spodní strany PP fólie, kde se hodnota volné povrchové energie po zvýšení dávky korony již dále neměnila. U vrchní strany PP fólie se při vyšších dávkách korony (dva a tři průjezdy koronovací hlavy) hodnota volné povrchové energie snížila ve srovnání s úpravou volné povrchové energie jedním průjezdem koronovací hlavy. Nejvýraznější pokles po úpravě koronovým výbojem byl zaznamenán během prvního dne od koronování. V dalších dnech byl pokles již pozvolnější s tím, že u první sady koronované jedním průjezdem došlo k poklesu volné povrchové energie na hodnoty blízké před úpravou přibližně po 46 dnech od koronování. U sad vzorků koronovaných dvěma a třemi průjezdy koronovací hlavy byl pokles sledován pouze jeden měsíc a po této době se volná povrchová energie ustálila u vrchní strany okolo hodnoty  $32 \text{ mJ/m}^2$  a u spodní strany okolo hodnoty  $29 \text{ mJ/m}^2$  u obou testovaných sad vzorků.

Rozdíly ve výsledcích jednotlivých měření i podobných studií poukazují na to, že měření kontaktního úhlu metodou přisedlé kapky na povrchu polymerní fólie je citlivé na manipulaci

se vzorkem, dodržení stálých podmínek při měření a skladování vzorků nebo i zkušenostech měřitele. Dále výslednou hodnotu volné povrchové energie ovlivňuje i velikost měřené kapky, čistota testovacích kapalin, drsnost materiálu apod. a je proto nutné dbát zvýšené opatrnosti při měření a snažit se eliminovat co nejvíce vnější vlivy pro dosažení hodnověrných výsledků.

## 4 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] OSSILA. *Surface Energy: Formula & Definition* [online]. 2023 [cit. 2024-05-31]. Dostupné z: <https://www.ossila.com/pages/a-guide-to-surface-energy>
- [2] MASARYKOVA UNIVERZITA. *Volná povrchová energie* [online]. 2015 [cit. 2024-06-01]. 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] CORROSIONPEDIA. *Surface Tension* [online]. 2018 [cit. 2024-05-31]. Dostupné z: <https://www.corrosionpedia.com/definition/surface-tension>
- [4] FYZIKA 007. *Povrchová síla, povrchové napětí* [online]. 2022 [cit. 2024-06-01]. Dostupné z: <https://www.fyzika007.cz/struktura-avlastnosti-latek/povrchova-sila-povrchove-napeti>
- [5] KAPLANOVÁ, Marie, Jan VALIŠ, Bohumil JAŠŮREK a Tomáš SYROVÝ. Effect of surface roughness on surface free energy of coated papers. *Scientific Papers of the University of Pardubice. Faculty of Chemical Technology* [online]. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2011, Series A (17), 307–321 [cit. 2024-06-11]. Dostupné z: <https://hdl.handle.net/10195/75347>
- [6] KAPLANOVÁ, Marie a kolektiv. *Moderní polygrafie*. Praha: Svaz polygrafických podnikatelů, 2009. ISBN 978-80-254-4230-2.
- [7] VYSOKÁ ŠKOLA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ V PRAZE. *Měření úhlu smáčení* [online]. 2022 [cit. 2024-06-01]. Dostupné z: [https://vydavatelstvi-old.vscht.cz/knihy/uid\\_es-001/hesla/mereni\\_uhlu\\_smaceni.html](https://vydavatelstvi-old.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/mereni_uhlu_smaceni.html)
- [8] VYSOKÁ ŠKOLA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ V PRAZE. *Vzestup kapaliny na svislé destičce* [online]. 2022 [cit. 2024-06-01]. Dostupné z: [https://vydavatelstvi-old.vscht.cz/knihy/uid\\_es-001/hesla/metody.elevace\\_na\\_desce.html](https://vydavatelstvi-old.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/metody.elevace_na_desce.html)
- [9] VYSOKÁ ŠKOLA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ V PRAZE. *Metoda vyvažování Wilhelmyho destičky* [online]. 2022 [cit. 2024-06-01]. Dostupné z: [https://vydavatelstvi-old.vscht.cz/knihy/uid\\_es-001/hesla/metody.vyvazovani\\_desky.html](https://vydavatelstvi-old.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/metody.vyvazovani_desky.html)
- [10] VYSOKÁ ŠKOLA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ V PRAZE. *Analýza profilu kapky* [online]. 2022 [cit. 2024-06-01]. Dostupné z: [https://vydavatelstvi-old.vscht.cz/knihy/uid\\_es-001/hesla/metody.analyza\\_profilu\\_kapky\\_ada.html](https://vydavatelstvi-old.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/metody.analyza_profilu_kapky_ada.html)
- [11] PAVLŮ, Barbora. *Studium volné povrchové energie polymerních tenkých vrstev připravených metodou PECVD*. Brno, 2014. Bakalářská práce. Masaríkova univerzita.

- [12] ŻENKIEWICZ, Marian. Methods for the calculation of surface free energy of solids. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2007, **24**(1), 137–144.
- [13] KRÜSS. *Method according to Wu* [online]. 2023 [cit. 2024-06-04]. Dostupné z: <https://www.kruss-scientific.com/en/know-how/glossary/method-according-to-wu>
- [14] SCHULTZ, Jacques a Michel NARDIN. Determination of the Surface Energy of Solids by the Two-Liquid-Phase Method. In: *Modern Approaches to Wettability*, eds.: E. SCHRADER, Malcolm a George I. LOEB. New York: Plenum Press, 1992, s. 73–100. ISBN 978-1-4899-1178-0. DOI:10.1007/978-1-4899-1176-6\_4
- [15] KRÜSS. *Oss and Good method* [online]. 2023 [cit. 2024-06-04]. Dostupné z: <https://www.kruss-scientific.com/en/know-how/glossary/oss-and-good-method>
- [16] KRÜSS. *Extended Fowkes method* [online]. 2023 [cit. 2024-06-04]. Dostupné z: <https://www.kruss-scientific.com/en/know-how/glossary/extended-fowkes-method>
- [17] PANDEY, Rajeev Ranjan Deo, Sumit KAUR a Binay Prakash AKHOURI. Equations of state approach for interpretation of contact angles. *International Journal of Chemical Studies*. 2023, **11**(1), 140–148.
- [18] LINDNER, Martina, Norbert RODLER, Marius JESDINSZKI, Markus SCHMID a Sven SÄNGERLAUB. 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]. Hoboken: Wiley Subscription Services, 2018, **135**(11) [cit. 2024-06-08]. DOI:10.1002/app.45842
- [19] HENNIKER PLASMA. *Plasma Treatment Explained in Simple Terms* [online]. 2023 [cit. 2024-06-07]. Dostupné z: <https://plasmatreatment.co.uk/pt/plasma-technology-overview/plasma-treatment-explained>
- [20] PLASMA ETCH. *What is Plasma Surface Activation?* [online]. 2022 [cit. 2024-06-07]. Dostupné z: <https://www.plasmaetch.com/plasma-activation.php>
- [21] RYCOBEL. *Flame treatment* [online]. 2024 [cit. 2024-06-08]. Dostupné z: <https://www.rycobel.com/optimization/surface-treatment/flame-treatment>
- [22] BRIGHTON SCIENCE. *Surface Treatment Processes: Flame Treatment* [online]. 2017 [cit. 2024-06-08]. Dostupné z: <https://www.brighton-science.com/blog/materials-science/surface-treatment-processes-flame-treatment>
- [23] RUDAKOWSKI, Siegmars. *UV light - A powerful tool for surface treatment* [online]. 2023 [cit. 2024-06-08]. Dostupné z: [https://www.circuitnet.com/news/uploads/1/Xeradex\\_VUV.pdf](https://www.circuitnet.com/news/uploads/1/Xeradex_VUV.pdf)
- [24] PCT EBEAM AND INTEGRATION. *Applications* [online]. 2022 [cit. 2024-06-08]. Dostupné z: <https://www.pctebi.com/ebeam-systems/applications/>

- [25] PROSTECH. *Surface Preparation: Key Treatments for Strong Adhesive Bonds in Manufacturing* [online]. 2024 [cit. 2024-06-08]. Dostupné z: <https://prostech.vn/surface-preparation-key-treatment-for-strong-adhesive-bonds-in-manufacturing/>
- [26] FLUOR TECHNIK SYSTEM. *Adhesion fluorination* [online]. 2024 [cit. 2024-06-08]. Dostupné z: <https://www.fts-de.com/en/solutions/adhesion-fluorination.html>
- [27] PIOUS, C.V. a Sabu THOMAS. Polymeric Materials-Structure, Properties, and Applications. In: *Printing on polymers*, eds.: IZDEBSKA, Joanna a Sabu THOMAS. William Andrew Publishing, 2016, s. 21–39. ISBN 978-0-323-37468-2. DOI:10.1016/B978-0-323-37468-2.00002-6
- [28] XOMETRY. *Polyethylene Terephthalate: Uses, Advantages, and Disadvantages* [online]. 2022 [cit. 2024-06-14]. Dostupné z: <https://www.xometry.com/resources/materials/polyethylene-terephthalate/>
- [29] GUIMOND, Sébastien, Ion RADU, Gregory CZEREMUSZKIN, David J. CARLSSON a Michael R. WERTHEIMER. Biaxially Oriented Polypropylene (BOPP) Surface Modification by Nitrogen Atmospheric Pressure Glow Discharge (APGD) and by Air Corona. *Plasmas and Polymers*. 2002, 7(1), 71–88. DOI:10.1023/A:1015274118642
- [30] GUIMOND, Sébastien a Michael R. WERTHEIMER. Surface degradation and hydrophobic recovery of polyolefins treated by air corona and nitrogen atmospheric pressure glow discharge. *Journal of Applied Polymer Science*. John Wiley & Sons, 2004, 94(3), 1291–1303. DOI:10.1002/app.21134
- [31] IZDEBSKA, Joanna. Corona Treatment. In *Printing on polymers*, eds.: IZDEBSKA, Joanna a Sabu THOMAS. William Andrew Publishing, 2016, s. 123–142. ISBN 978-0-323-37468-2. DOI:10.1016/B978-0-323-37468-2.00008-7
- [32] RADICI FILM. *BOPP Coextruded film*. Materiál firmy Radici Film. 2024
- [33] PCC GROUP. *Vlastnosti a použití etylenglykolu* [online]. 2022 [cit. 2024-06-15]. Dostupné z: <https://www.products.pcc.eu/cs/blog/vlastnosti-a-pouziti-etylenglykolu/>
- [34] NATIONAL LIBRARY OF MEDICINE. *Formamide* [online]. 2024 [cit. 2024-06-15]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/713#section=Uses>
- [35] NATIONAL LIBRARY OF MEDICINE. *Diiodomethane* [online]. 2024 [cit. 2024-06-15]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Diiodomethane#section=1D-NMR-Spectra>

## PŘÍLOHY

Příloha 1: Volná povrchová energie neupravených PP fólií a jejich polární a disperzní složky .....	48
Příloha 2: První sada – Volná povrchová energie upravených vrchních stran PP fólií jedním průjezdem koronovací hlavy a jejich polární a disperzní složky .....	49
Příloha 3: První sada – Volná povrchová energie upravených spodních stran PP fólií jedním průjezdem koronovací hlavy a jejich polární a disperzní složky .....	50
Příloha 4: Druhá sada – Volná povrchová energie upravených vrchních stran PP fólií jedním průjezdem koronovací hlavy a jejich polární a disperzní složky .....	51
Příloha 5: Druhá sada – Volná povrchová energie upravených spodních stran PP fólií jedním průjezdem koronovací hlavy a jejich polární a disperzní složky .....	52
Příloha 6: Třetí sada – Volná povrchová energie upravených vrchních stran PP fólií dvěma průjezdy koronovací hlavy a jejich polární a disperzní složky .....	53
Příloha 7: Třetí sada – Volná povrchová energie upravených spodních stran PP fólií dvěma průjezdy koronovací hlavy a jejich polární a disperzní složky .....	54
Příloha 8: Čtvrtá sada – Volná povrchová energie upravených vrchních stran PP fólií třemi průjezdy koronovací hlavy a jejich polární a disperzní složky .....	55
Příloha 9: Čtvrtá sada – Volná povrchová energie upravených spodních stran PP fólií třemi průjezdy koronovací hlavy a jejich polární a disperzní složky .....	56

**Příloha 1:** Volná povrchová energie neupravených PP fólií a jejich polární a disperzní složky

den měření	vrchní strana			spodní strana		
	$\sigma_s$ (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> )	$\sigma_{s^p}$ (mJ/m <sup>2</sup> )	$\sigma_{s^d}$ (mJ/m <sup>2</sup> )
8. 3.	30,54	3,73	26,81	23,94	2,39	21,56
	30,02	4,75	25,28	24,46	1,64	22,81
	30,87	4,30	26,58	24,59	1,67	22,93
<b>průměr</b>	<b>30,48</b>	<b>4,26</b>	<b>26,22</b>	<b>24,33</b>	<b>1,90</b>	<b>22,43</b>
<b>s</b>	<b>0,43</b>	<b>0,51</b>	<b>0,83</b>	<b>0,34</b>	<b>0,42</b>	<b>0,76</b>
5. 4.	30,34	4,38	25,97	23,67	1,95	21,72
	30,78	4,37	26,40	24,21	1,68	22,53
	29,47	3,89	25,57	24,61	1,55	23,06
<b>průměr</b>	<b>30,19</b>	<b>4,21</b>	<b>25,98</b>	<b>24,16</b>	<b>1,73</b>	<b>22,44</b>
<b>s</b>	<b>0,67</b>	<b>0,28</b>	<b>0,42</b>	<b>0,48</b>	<b>0,20</b>	<b>0,68</b>
9. 5.	29,24	4,11	25,13	24,22	1,63	22,59
	28,84	4,10	24,73	24,46	1,48	22,98
	30,01	4,20	25,81	24,27	1,75	22,52
<b>průměr</b>	<b>29,36</b>	<b>4,14</b>	<b>25,22</b>	<b>24,32</b>	<b>1,62</b>	<b>22,70</b>
<b>s</b>	<b>0,60</b>	<b>0,06</b>	<b>0,54</b>	<b>0,12</b>	<b>0,14</b>	<b>0,25</b>

**Příloha 2: První sada – Volná povrchová energie upravených vrchních stran PP fólií jedním průřezem koronovací hlavy a jejich polární a disperzní složky**

den měření	čas po koruně	vrchní strana		
		$\sigma_s$ (mJ/m <sup>2</sup> )	$\sigma_s^p$ (mJ/m <sup>2</sup> )	$\sigma_s^d$ (mJ/m <sup>2</sup> )
19. 2.	0 h	44,93	21,33	23,60
		44,90	22,16	22,74
		43,79	19,77	24,02
	<b>průměr</b>	<b>44,54</b>	<b>21,09</b>	<b>23,45</b>
	<b>s</b>	<b>0,65</b>	<b>1,21</b>	<b>0,65</b>
	3,5 h	36,13	3,43	32,70
		36,69	3,48	33,21
		36,73	3,73	33,01
<b>průměr</b>	<b>36,52</b>	<b>3,55</b>	<b>32,97</b>	
<b>s</b>	<b>0,34</b>	<b>0,16</b>	<b>0,26</b>	
20. 2.	1 den	33,18	5,74	27,45
		32,91	5,81	27,10
		32,33	5,67	26,66
	<b>průměr</b>	<b>32,81</b>	<b>5,74</b>	<b>27,07</b>
	<b>s</b>	<b>0,44</b>	<b>0,07</b>	<b>0,39</b>
21. 2.	2 dny	33,39	5,78	27,61
		32,47	6,28	26,18
		32,40	5,70	26,70
	<b>průměr</b>	<b>32,75</b>	<b>5,92</b>	<b>26,83</b>
	<b>s</b>	<b>0,56</b>	<b>0,32</b>	<b>0,72</b>
23. 2.	4 dny	36,75	5,65	31,10
		35,08	5,99	29,10
		34,98	5,88	29,10
	<b>průměr</b>	<b>35,60</b>	<b>5,84</b>	<b>29,76</b>
	<b>s</b>	<b>0,99</b>	<b>0,17</b>	<b>1,15</b>
28. 2.	9 dnů	33,86	6,29	27,57
		33,87	6,19	27,69
		33,95	5,62	28,33
	<b>průměr</b>	<b>33,89</b>	<b>6,03</b>	<b>27,86</b>
	<b>s</b>	<b>0,05</b>	<b>0,36</b>	<b>0,41</b>
8. 3.	18 dnů	32,83	3,83	28,99
		33,36	4,66	28,70
		33,33	4,87	28,46
	<b>průměr</b>	<b>33,17</b>	<b>4,45</b>	<b>28,72</b>
	<b>s</b>	<b>0,30</b>	<b>0,55</b>	<b>0,27</b>
5. 4.	46 dnů	30,60	4,63	25,97
		30,33	4,22	26,10
		30,43	4,25	26,18
	<b>průměr</b>	<b>30,45</b>	<b>4,37</b>	<b>26,08</b>
	<b>s</b>	<b>0,14</b>	<b>0,23</b>	<b>0,11</b>

**Příloha 3: První sada** – Volná povrchová energie upravených spodních stran PP fólií jedním průřezem koronovací hlavy a jejich polární a disperzní složky

den měření	čas po koruně	spodní strana		
		$\sigma_s$ (mJ/m <sup>2</sup> )	$\sigma_s^p$ (mJ/m <sup>2</sup> )	$\sigma_s^d$ (mJ/m <sup>2</sup> )
19. 2.	0 h	38,70	14,94	23,76
		36,94	12,31	24,63
		35,73	12,25	23,47
	<b>průměr</b>	<b>37,12</b>	<b>13,17</b>	<b>23,95</b>
	<b>s</b>	<b>1,50</b>	<b>1,54</b>	<b>0,60</b>
	3,5 h	29,28	4,78	24,50
		30,35	4,91	25,44
		30,54	5,02	25,52
	<b>průměr</b>	<b>30,06</b>	<b>4,90</b>	<b>25,16</b>
<b>s</b>	<b>0,68</b>	<b>0,12</b>	<b>0,57</b>	
20. 2.	1 den	30,21	11,34	18,87
		30,13	7,96	22,17
		29,06	7,20	21,87
	<b>průměr</b>	<b>29,80</b>	<b>8,83</b>	<b>20,97</b>
	<b>s</b>	<b>0,64</b>	<b>2,21</b>	<b>1,82</b>
21. 2.	2 dny	28,62	3,26	25,36
		28,81	4,81	24,00
		27,68	3,66	24,02
	<b>průměr</b>	<b>28,37</b>	<b>3,91</b>	<b>24,46</b>
	<b>s</b>	<b>0,61</b>	<b>0,80</b>	<b>0,78</b>
23. 2.	4 dny	29,59	4,89	24,70
		30,06	5,67	24,39
		31,64	5,18	26,46
	<b>průměr</b>	<b>30,43</b>	<b>5,25</b>	<b>25,18</b>
	<b>s</b>	<b>1,08</b>	<b>0,39</b>	<b>1,12</b>
28. 2.	9 dnů	32,76	4,55	28,22
		32,45	4,27	28,18
		33,16	3,93	29,23
	<b>průměr</b>	<b>32,79</b>	<b>4,25</b>	<b>28,54</b>
	<b>s</b>	<b>0,36</b>	<b>0,31</b>	<b>0,60</b>
8. 3.	18 dnů	28,13	3,44	24,69
		29,80	3,65	26,15
		30,22	3,70	26,52
	<b>průměr</b>	<b>29,38</b>	<b>3,60</b>	<b>25,79</b>
	<b>s</b>	<b>1,11</b>	<b>0,14</b>	<b>0,97</b>
5. 4.	46 dnů	27,97	4,00	23,97
		28,50	3,29	25,21
		28,33	3,01	25,32
	<b>průměr</b>	<b>28,27</b>	<b>3,43</b>	<b>24,83</b>
	<b>s</b>	<b>0,27</b>	<b>0,51</b>	<b>0,75</b>

**Příloha 4: Druhá sada** – Volná povrchová energie upravených vrchních stran PP fólií jedním průjezdem koronovací hlavy a jejich polární a disperzní složky

den měření	čas po koruně	vrchní strana		
		$\sigma_s$ (mJ/m <sup>2</sup> )	$\sigma_s^p$ (mJ/m <sup>2</sup> )	$\sigma_s^d$ (mJ/m <sup>2</sup> )
26. 2.	0 h	43,08	12,00	31,08
		42,28	12,35	29,93
		42,02	12,36	29,67
	<b>průměr</b>	<b>42,46</b>	<b>12,24</b>	<b>30,23</b>
	<b>s</b>	<b>0,55</b>	<b>0,20</b>	<b>0,75</b>
	2 h	33,24	5,77	27,48
		35,02	6,64	28,38
		34,78	6,23	28,56
	<b>průměr</b>	<b>34,35</b>	<b>6,21</b>	<b>28,14</b>
	<b>s</b>	<b>0,96</b>	<b>0,44</b>	<b>0,58</b>
	5 h	34,73	4,66	30,07
		34,11	5,20	28,91
		34,42	5,40	29,02
<b>průměr</b>	<b>34,42</b>	<b>5,09</b>	<b>29,33</b>	
<b>s</b>	<b>0,31</b>	<b>0,38</b>	<b>0,64</b>	
27. 2.	1 den	37,42	4,49	32,94
		38,17	4,64	33,53
		38,01	5,54	32,47
	<b>průměr</b>	<b>37,87</b>	<b>4,89</b>	<b>32,98</b>
	<b>s</b>	<b>0,39</b>	<b>0,57</b>	<b>0,53</b>
28. 2.	2 dny	35,49	7,10	28,39
		34,72	6,85	27,87
		34,71	6,72	27,98
	<b>průměr</b>	<b>34,97</b>	<b>6,89</b>	<b>28,08</b>
	<b>s</b>	<b>0,45</b>	<b>0,19</b>	<b>0,27</b>
4. 3.	7 dnů	34,72	8,32	26,40
		34,41	6,41	28,00
		33,90	5,67	28,23
	<b>průměr</b>	<b>34,35</b>	<b>6,80</b>	<b>27,55</b>
	<b>s</b>	<b>0,41</b>	<b>1,37</b>	<b>1,00</b>
6. 3.	9 dnů	34,93	5,87	29,06
		34,96	6,02	28,93
		35,47	6,03	29,45
	<b>průměr</b>	<b>35,12</b>	<b>5,97</b>	<b>29,15</b>
	<b>s</b>	<b>0,31</b>	<b>0,09</b>	<b>0,27</b>

**Příloha 5: Druhá sada** – Volná povrchová energie upravených spodních stran PP fólií jedním průjezdem koronovací hlavy a jejich polární a disperzní složky

den měření	čas po koruně	spodní strana		
		$\sigma_s$ (mJ/m <sup>2</sup> )	$\sigma_s^p$ (mJ/m <sup>2</sup> )	$\sigma_s^d$ (mJ/m <sup>2</sup> )
4. 3.	0 h	37,37	8,81	28,56
		37,03	8,85	28,19
		37,11	8,56	28,56
	<b>průměr</b>	<b>37,17</b>	<b>8,74</b>	<b>28,43</b>
	<b>s</b>	<b>0,17</b>	<b>0,16</b>	<b>0,21</b>
	2 h	33,89	6,74	27,15
		33,91	6,60	27,31
		33,64	5,87	27,77
	<b>průměr</b>	<b>33,81</b>	<b>6,40</b>	<b>27,41</b>
	<b>s</b>	<b>0,15</b>	<b>0,47</b>	<b>0,33</b>
	5 h	30,35	4,06	26,29
		30,39	4,68	25,71
		30,30	4,51	25,79
		<b>průměr</b>	<b>30,35</b>	<b>4,42</b>
<b>s</b>	<b>0,04</b>	<b>0,32</b>	<b>0,32</b>	
5. 3.	1 den	35,00	9,02	25,98
		34,28	8,42	25,86
		34,52	8,17	26,35
	<b>průměr</b>	<b>34,60</b>	<b>8,54</b>	<b>26,06</b>
	<b>s</b>	<b>0,36</b>	<b>0,44</b>	<b>0,25</b>
6. 3.	2 dny	32,46	5,34	27,11
		32,64	4,88	27,77
		32,85	5,12	27,73
	<b>průměr</b>	<b>32,65</b>	<b>5,11</b>	<b>27,54</b>
	<b>s</b>	<b>0,20</b>	<b>0,23</b>	<b>0,37</b>
8. 3.	4 dny	31,20	4,04	27,15
		32,06	3,36	28,70
		31,99	4,52	27,47
	<b>průměr</b>	<b>31,75</b>	<b>3,97</b>	<b>27,77</b>
	<b>s</b>	<b>0,48</b>	<b>0,59</b>	<b>0,82</b>
22. 3.	18 dnů	27,87	3,62	24,25
		28,45	4,05	24,41
		28,13	4,16	23,97
	<b>průměr</b>	<b>28,15</b>	<b>3,94</b>	<b>24,21</b>
	<b>s</b>	<b>0,29</b>	<b>0,28</b>	<b>0,22</b>

**Příloha 6: Třetí sada – Volná povrchová energie upravených vrchních stran PP fólií dvěma průjezdy koronovací hlavy a jejich polární a disperzní složky**

den měření	čas po koruně	vrchní strana		
		$\sigma_s$ (mJ/m <sup>2</sup> )	$\sigma_s^p$ (mJ/m <sup>2</sup> )	$\sigma_s^d$ (mJ/m <sup>2</sup> )
25. 3.	0 h	36,55	7,13	29,43
		36,76	6,66	30,10
		37,84	9,67	28,17
	<b>průměr</b>	<b>37,05</b>	<b>7,82</b>	<b>29,23</b>
	<b>s</b>	<b>0,69</b>	<b>1,62</b>	<b>0,98</b>
	2 h	34,70	7,18	27,52
		34,56	6,59	27,97
		35,07	7,54	27,53
	<b>průměr</b>	<b>34,77</b>	<b>7,10</b>	<b>27,67</b>
	<b>s</b>	<b>0,26</b>	<b>0,48</b>	<b>0,26</b>
	5 h	32,44	6,85	25,59
		31,55	5,45	26,10
		32,82	6,13	26,69
		<b>průměr</b>	<b>32,27</b>	<b>6,14</b>
<b>s</b>	<b>0,65</b>	<b>0,70</b>	<b>0,55</b>	
26. 3.	1 den	33,09	5,42	27,67
		32,98	4,83	28,15
		32,83	5,21	27,63
	<b>průměr</b>	<b>32,97</b>	<b>5,15</b>	<b>27,82</b>
	<b>s</b>	<b>0,13</b>	<b>0,30</b>	<b>0,29</b>
27. 3.	2 dny	32,87	5,25	27,62
		32,96	5,20	27,76
		32,90	5,14	27,76
	<b>průměr</b>	<b>32,91</b>	<b>5,19</b>	<b>27,72</b>
	<b>s</b>	<b>0,05</b>	<b>0,05</b>	<b>0,08</b>
3. 4.	9 dnů	33,28	4,95	28,32
		32,70	5,19	27,51
		32,46	4,92	27,54
	<b>průměr</b>	<b>32,81</b>	<b>5,02</b>	<b>27,79</b>
<b>s</b>	<b>0,42</b>	<b>0,15</b>	<b>0,46</b>	
10. 4.	16 dnů	33,09	5,23	27,86
		32,69	5,52	27,16
		33,05	5,37	27,68
	<b>průměr</b>	<b>32,94</b>	<b>5,38</b>	<b>27,57</b>
	<b>s</b>	<b>0,22</b>	<b>0,15</b>	<b>0,36</b>
24. 4.	30 dnů	32,60	4,08	28,53
		32,77	3,83	28,94
		32,21	4,30	27,91
	<b>průměr</b>	<b>32,53</b>	<b>4,07</b>	<b>28,46</b>
	<b>s</b>	<b>0,29</b>	<b>0,23</b>	<b>0,52</b>

**Příloha 7: Třetí sada** – Volná povrchová energie upravených spodních stran PP fólií dvěma průřezdy koronovací hlavy a jejich polární a disperzní složky

den měření	čas po koruně	spodní strana		
		$\sigma_s$ (mJ/m <sup>2</sup> )	$\sigma_s^p$ (mJ/m <sup>2</sup> )	$\sigma_s^d$ (mJ/m <sup>2</sup> )
15. 4.	0 h	36,50	4,10	32,39
		37,19	5,48	31,71
		35,46	3,87	31,59
	<b>průměr</b>	<b>36,38</b>	<b>4,49</b>	<b>31,90</b>
	<b>s</b>	<b>0,87</b>	<b>0,87</b>	<b>0,43</b>
	2 h	33,65	5,11	28,54
		34,38	6,93	27,45
		33,81	5,67	28,14
	<b>průměr</b>	<b>33,95</b>	<b>5,90</b>	<b>28,04</b>
	<b>s</b>	<b>0,38</b>	<b>0,93</b>	<b>0,55</b>
	5 h	33,80	4,60	29,20
		34,24	4,46	29,78
		34,21	4,53	29,68
<b>průměr</b>	<b>34,08</b>	<b>4,53</b>	<b>29,55</b>	
<b>s</b>	<b>0,25</b>	<b>0,07</b>	<b>0,31</b>	
16. 4.	1 den	32,13	4,70	27,43
		33,14	5,61	27,52
		32,19	4,49	27,71
	<b>průměr</b>	<b>32,49</b>	<b>4,93</b>	<b>27,55</b>
	<b>s</b>	<b>0,56</b>	<b>0,60</b>	<b>0,14</b>
17. 4.	2 dny	32,87	4,18	28,69
		33,13	4,49	28,64
		33,08	4,03	29,05
	<b>průměr</b>	<b>33,02</b>	<b>4,23</b>	<b>28,79</b>
	<b>s</b>	<b>0,14</b>	<b>0,23</b>	<b>0,22</b>
24. 4.	9 dnů	31,19	4,46	26,73
		31,58	4,34	27,24
		31,76	4,19	27,57
	<b>průměr</b>	<b>31,51</b>	<b>4,33</b>	<b>27,18</b>
<b>s</b>	<b>0,29</b>	<b>0,14</b>	<b>0,42</b>	
3. 5.	18 dnů	30,92	3,08	27,84
		30,25	3,10	27,15
		29,85	3,04	26,81
	<b>průměr</b>	<b>30,34</b>	<b>3,07</b>	<b>27,27</b>
	<b>s</b>	<b>0,54</b>	<b>0,03</b>	<b>0,52</b>
15. 5.	30 dnů	28,97	2,68	26,29
		28,85	2,70	26,14
		29,24	3,08	26,16
	<b>průměr</b>	<b>29,02</b>	<b>2,82</b>	<b>26,20</b>
	<b>s</b>	<b>0,20</b>	<b>0,22</b>	<b>0,08</b>

**Příloha 8: Čtvrtá sada** – Volná povrchová energie upravených vrchních stran PP fólií třemi průjezdy koronovací hlavy a jejich polární a disperzní složky

den měření	čas po koruně	vrchní strana		
		$\sigma_s$ (mJ/m <sup>2</sup> )	$\sigma_s^p$ (mJ/m <sup>2</sup> )	$\sigma_s^d$ (mJ/m <sup>2</sup> )
18. 3.	0 h	38,63	10,41	28,23
		38,35	12,21	26,14
		39,27	14,93	24,34
	<b>průměr</b>	<b>38,75</b>	<b>12,52</b>	<b>26,23</b>
	<b>s</b>	<b>0,47</b>	<b>2,28</b>	<b>1,95</b>
	2 h	35,58	9,76	25,82
		36,93	12,35	24,58
		36,80	11,86	24,94
	<b>průměr</b>	<b>36,44</b>	<b>11,33</b>	<b>25,11</b>
	<b>s</b>	<b>0,75</b>	<b>1,38</b>	<b>0,64</b>
	5 h	35,45	10,00	25,45
		35,73	10,16	25,57
36,30		11,04	25,26	
<b>průměr</b>	<b>35,83</b>	<b>10,40</b>	<b>25,43</b>	
<b>s</b>	<b>0,43</b>	<b>0,56</b>	<b>0,16</b>	
19. 3.	1 den	33,13	5,32	27,81
		32,20	6,05	26,15
		32,79	6,22	26,57
	<b>průměr</b>	<b>32,71</b>	<b>5,86</b>	<b>26,84</b>
<b>s</b>	<b>0,47</b>	<b>0,48</b>	<b>0,86</b>	
20. 3.	2 dny	32,70	4,08	28,62
		32,77	4,24	28,53
		32,98	4,34	28,64
	<b>průměr</b>	<b>32,82</b>	<b>4,22</b>	<b>28,60</b>
<b>s</b>	<b>0,15</b>	<b>0,13</b>	<b>0,06</b>	
22. 3.	4 dny	31,81	4,87	26,93
		31,49	4,62	26,87
		31,77	4,08	27,69
	<b>průměr</b>	<b>31,69</b>	<b>4,52</b>	<b>27,16</b>
<b>s</b>	<b>0,17</b>	<b>0,41</b>	<b>0,45</b>	
27. 3.	9 dnů	33,37	5,10	28,28
		32,99	4,72	28,28
		32,81	4,61	28,20
	<b>průměr</b>	<b>33,06</b>	<b>4,81</b>	<b>28,25</b>
<b>s</b>	<b>0,29</b>	<b>0,26</b>	<b>0,04</b>	
5. 4.	18 dnů	31,82	4,01	27,81
		32,67	4,35	28,32
		33,68	4,47	29,21
	<b>průměr</b>	<b>32,72</b>	<b>4,28</b>	<b>28,45</b>
<b>s</b>	<b>0,93</b>	<b>0,24</b>	<b>0,71</b>	
17. 4.	30 dnů	32,01	4,19	27,82
		32,56	4,12	28,45
		32,03	4,23	27,79
	<b>průměr</b>	<b>32,20</b>	<b>4,18</b>	<b>28,02</b>
<b>s</b>	<b>0,31</b>	<b>0,06</b>	<b>0,37</b>	

**Příloha 9: Čtvrtá sada** – Volná povrchová energie upravených spodních stran PP fólií třemi průjezdy koronovací hlavy a jejich polární a disperzní složky

den měření	čas po koruně	spodní strana		
		$\sigma_s$ (mJ/m <sup>2</sup> )	$\sigma_s^p$ (mJ/m <sup>2</sup> )	$\sigma_s^d$ (mJ/m <sup>2</sup> )
8. 4.	0 h	37,03	6,90	30,13
		36,93	7,22	29,71
		37,11	6,61	30,50
	<b>průměr</b>	<b>37,02</b>	<b>6,91</b>	<b>30,11</b>
	<b>s</b>	<b>0,09</b>	<b>0,31</b>	<b>0,40</b>
	2 h	34,84	7,30	27,54
		34,49	6,84	27,65
		35,23	6,61	28,62
	<b>průměr</b>	<b>34,85</b>	<b>6,92</b>	<b>27,93</b>
	<b>s</b>	<b>0,37</b>	<b>0,35</b>	<b>0,59</b>
	5 h	32,56	4,11	28,45
		33,09	4,51	28,59
		33,08	4,30	28,78
	<b>průměr</b>	<b>32,91</b>	<b>4,31</b>	<b>28,61</b>
<b>s</b>	<b>0,31</b>	<b>0,20</b>	<b>0,17</b>	
9. 4.	1 den	30,30	2,93	27,37
		30,64	4,19	26,45
		30,34	4,54	25,80
	<b>průměr</b>	<b>30,43</b>	<b>3,89</b>	<b>26,54</b>
	<b>s</b>	<b>0,19</b>	<b>0,85</b>	<b>0,79</b>
10. 4.	2 dny	32,74	3,75	28,99
		32,60	3,87	28,73
		32,42	3,92	28,50
	<b>průměr</b>	<b>32,59</b>	<b>3,85</b>	<b>28,74</b>
	<b>s</b>	<b>0,16</b>	<b>0,09</b>	<b>0,24</b>
17. 4.	9 dnů	32,90	4,01	28,89
		32,65	3,69	28,96
		32,75	4,08	28,68
	<b>průměr</b>	<b>32,77</b>	<b>3,93</b>	<b>28,84</b>
	<b>s</b>	<b>0,12</b>	<b>0,20</b>	<b>0,15</b>
24. 4.	16 dnů	32,49	5,20	27,29
		32,80	5,26	27,54
		32,23	5,53	26,70
	<b>průměr</b>	<b>32,51</b>	<b>5,33</b>	<b>27,17</b>
	<b>s</b>	<b>0,28</b>	<b>0,18</b>	<b>0,43</b>
9. 5.	31 dnů	29,05	2,79	26,25
		29,35	2,80	26,56
		28,86	2,74	26,12
	<b>průměr</b>	<b>29,09</b>	<b>2,78</b>	<b>26,31</b>
	<b>s</b>	<b>0,25</b>	<b>0,03</b>	<b>0,22</b>