

Univerzita Pardubice  
Fakulta chemicko-technologická  
Katedra polygrafie a fotofyziky

Vliv vnějších podmínek na změnu volné povrchové energie polyethylenu  
po úpravě koronovacím zařízením

Diplomová práce

Univerzita Pardubice  
Fakulta chemicko-technologická  
Akademický rok: 2024/2025

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Veronika Holeňová**  
Osobní číslo: **C23239**  
Studijní program: **N0531A130013 Polygrafie**  
Téma práce: **Vliv vnějších podmínek na změnu volné povrchové energie polyethylenu po úpravě koronovacím zařízením**  
Téma práce anglicky: **Influence of external conditions on the change in the free surface energy of polyethylene after treatment with a corona device**  
Zadávající katedra: **Katedra polygrafie a fotofyziky**

## Zásady pro vypracování

1. Zpracujte literární rešerši zaměřenou na problematiku úpravy volné povrchové energie polymerních materiálů.
2. Zpracujte literární rešerši zaměřenou na měření a vyhodnocení volné povrchové energie polymerních materiálů.
3. U polyetylenové fólie proměřte volnou povrchovou energii a její změnu po úpravě v koronovacím zařízení a dále její změnu v čase za rozdílných podmínek skladování.
4. Dosažené výsledky analyzujte a souhrnně zpracujte ve formě závěrečné písemné práce.

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

Seznam doporučené literatury:

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

Oponent diplomové práce: **Ing. Jan Řezáč**

Datum zadání diplomové práce: **19. února 2025**  
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2025**

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

L.S.

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

V Pardubicích dne 19. února 2025

Prohlašuji:

Práci s názvem Vliv vnějších podmínek na změnu volné povrchové energie polyethylenu po úpravě koronovacím zařízením 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 9. 5. 2025

Bc. Veronika Holeňová v.r.

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Bohumilu Jašůrkovi, Ph.D., za cenné rady, odborné vedení a podporu během zpracování této práce. Dále děkuji své rodině a přátelům za podporu a povzbuzení po celou dobu studia.

## **ANOTACE**

Tato diplomová práce se zaměřuje na sledování změn volné povrchové energie polyethylenové fólie po úpravě koronovým výbojem. Byla hodnocena stabilita této úpravy v čase při různých teplotách skladování (10 °C, pokojové teplotě a 40 °C). Výsledky ukazují rozdílnou dynamiku poklesu povrchové energie u vyšší teploty a potvrzují dočasné působení koronové úpravy. Součástí práce je teoretický přehled vlastností polyethylenu, principů úpravy a hodnocení volné povrchové energie. V experimentální části je popsán průběh měření, použitá zařízení a výpočetní postup. Výsledky jsou dále vyhodnoceny a diskutovány z hlediska vlivu teploty a času na změnu volné povrchové energie

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Volná povrchová energie, polyethylen, kontaktní úhel, korona, vliv teploty

## **TITLE**

Influence of external conditions on the change in the free surface energy of polyethylene after treatment with a corona device

## **ANNOTATION**

This diploma thesis focuses on monitoring the changes in the surface free energy of polyethylene film after corona treatment. The stability of the surface modification was evaluated over time under different storage temperatures (10 °C, room temperature, and 40 °C). The results show different dynamics of surface energy decay at higher temperatures and confirm the temporary effect of corona treatment. The thesis also includes a theoretical overview of polyethylene properties, surface treatment principles, and surface free energy evaluation methods. The experimental section describes the measurement procedure, the used equipments, and the calculation method. The results are further evaluated and discussed with respect to the influence of temperature and time on the polymer surface free energy.

## **KEYWORDS**

Surface Free Energy, Polyethylene, Contact Angle, Corona, Influence of Temperature

# OBSAH

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK.....	8
ÚVOD.....	9
1 TEORETICKÁ ČÁST .....	10
1.1    Volná povrchová energie pevných látek a povrchové napětí kapalin .....	10
1.2    Metody měření volné povrchové energie a kontaktní úhel.....	11
1.2.1.    Metody měření volné povrchové energie .....	11
1.3    Úprava povrchu materiálu pro zvýšení volné povrchové energie .....	16
1.3.1    Úprava volné povrchové energie materiálu pomocí koronového výboje .....	16
1.3.2    Úprava volné povrchové energie materiálu pomocí plazmy .....	18
1.3.3    Úprava volné povrchové energie materiálu pomocí plamene .....	19
1.4    Polyethylen .....	20
1.5    Výsledky studií zabývajících se volnou povrchovou energií polyethylenu .....	21
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	23
2.1 Polyethylenová fólie .....	23
2.2 Testovací kapaliny .....	23
2.3 Testovací fixy a inkousty .....	24
2.4 Použité přístroje a vybavení.....	24
2.4.1 Koronovací zařízení Lab Treator ASL 400 TUM .....	24
2.4.2 Mikrostříkačka SETonic .....	25
2.4.3 Přístroj OCA 50 pro měření kontaktního úhlu.....	25
2.5 Úprava PE fólie a postup měření volné povrchové energie.....	26
2.6    Výsledky a diskuze .....	29
2.6.1    Výsledky měření neupravené polyethylenové fólie.....	29
2.6.2    Změna volné povrchové energie PE fólie po úpravě korunou v čase skladovaná při pokojové teplotě .....	30
2.6.3    Změna volné povrchové energie PE fólie po úpravě korunou v čase skladované při 10 °C .....	31
2.6.4 Změna volné povrchové energie PE fólie po úpravě korunou v čase skladované při 40 °C .....	33
ZÁVĚR .....	36
PŘÍLOHY .....	41

## SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1: Kontaktní úhel ( $\theta$ ) a mezipovrchová napětí ( $\sigma_{ls}$ , $\sigma_{sg}$ a $\sigma_{lg}$ ) u kapky kapaliny na pevném povrchu [4].....	11
Obrázek 2: Grafické znázornění závislosti kontaktního úhlu na povrchovém napětí použitých kapalin podle metody OWRK [10].....	13
Obrázek 3: Určení kritického povrchového napětí $\sigma_s$ pomocí Zismanovy metody [10].....	14
Obrázek 4: Testovací inkousty a fixy o známém povrchovém napětí značky Arcotest [15] ...	16
Obrázek 5: Znázornění principu koronového výboje (upraveno z [18]) .....	17
Obrázek 6: Strukturní vzorec polyethylenu (PE).....	20
Obrázek 7: Koronovací zařízení Lab Treator ASL 400 TUM (vlevo) a stříkačka SETonic (vpravo).....	25

Tabulka 1: Průměrné hodnoty volné povrchové energie ( $\gamma_s$ ) včetně hodnot polárních ( $\gamma_s^P$ ) a disperzních ( $\gamma_s^D$ ) složek upravené PE fólie skladované při pokojové teplotě a výběrová směrodatná odchylka (s) .....	29
Tabulka 2: Průměrné hodnoty volné povrchové energie ( $\gamma_s$ ) včetně hodnot polárních ( $\gamma_s^P$ ) a disperzních ( $\gamma_s^D$ ) složek upravené PE fólie skladované při pokojové teplotě a výběrová směrodatná odchylka (s). První série měření (4. 11. 2024 – 1. 4. 2025) .....	30
Tabulka 3: Průměrné hodnoty volné povrchové energie ( $\gamma_s$ ) včetně hodnot polárních ( $\gamma_s^P$ ) a disperzních ( $\gamma_s^D$ ) složek upravené PE fólie skladované při pokojové teplotě a výběrová směrodatná odchylka (s). Druhá série měření (5. 12. 2024 – 1. 4. 2025).....	31
Tabulka 4: Průměrné hodnoty volné povrchové energie ( $\gamma_s$ ) včetně hodnot polárních ( $\gamma_s^P$ ) a disperzních ( $\gamma_s^D$ ) složek upravené PE fólie skladované při 10 °C a výběrová směrodatná odchylka (s). První série měření (28. 11. 2024 – 1. 4. 2025).....	32
Tabulka 5: Průměrné hodnoty volné povrchové energie ( $\gamma_s$ ) včetně hodnot polárních ( $\gamma_s^P$ ) a disperzních ( $\gamma_s^D$ ) složek upravené PE fólie skladované při 10 °C a výběrová směrodatná odchylka (s). Druhá série měření (5. 12. 2024 – 1. 4. 2025) .....	33
Tabulka 6: Průměrné hodnoty volné povrchové energie ( $\gamma_s$ ) včetně hodnot polárních ( $\gamma_s^P$ ) a disperzních ( $\gamma_s^D$ ) složek upravené PE fólie skladované při 40 °C a výběrová směrodatná odchylka (s). První série měření (14. 1. 2025 – 1. 4. 2025).....	34
Tabulka 7: Průměrné hodnoty volné povrchové energie ( $\gamma_s$ ) včetně hodnot polárních ( $\gamma_s^P$ ) a disperzních ( $\gamma_s^D$ ) složek upravené PE fólie skladované při 40 °C a výběrová směrodatná odchylka (s). Druhá série měření (15. 1. 2024 – 1. 4. 2025) .....	34

## ÚVOD

Polymerní materiály, a zejména polyethylen, patří díky svým mechanickým vlastnostem, nízké ceně a chemické odolnosti k nejrozšířenějším plastovým materiálům v průmyslové praxi. Přestože mají mnoho výhod, jejich nízká povrchová energie a s tím související špatná smáčivost představují zásadní problém v případech, kdy je nutné zajistit dobrou přilnavost barev, lepidel či nátěrů. Jednou z nejčastěji využívaných metod pro úpravu povrchu polymerních fólií je koronový výboj, který dokáže krátkodobě zvýšit povrchovou energii a tím zlepšit funkčnost materiálu pro další zpracování.

Cílem této diplomové práce je sledování změny volné povrchové energie PE fólie v čase po úpravě koronou a hodnocení její časové stability za různých teplot skladování. Měření byla prováděna při třech různých teplotách (10 °C, pokojové teplotě a 40 °C). Hlavním cílem je zjistit, jak rychle se mění (snižuje) efekt úpravy volné povrchové energie, a zda vyšší teploty tento proces urychlují.

# 1 TEORETICKÁ ČÁST

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

Volná povrchová energie, jak je uvedeno ve zdroji [1] označuje energii, kterou mají molekuly na povrchu materiálu ve srovnání s molekulami uvnitř. Molekuly na povrchu postrádají sousední molekuly stejného typu na jedné straně, což způsobuje nerovnováhu přitažlivých sil, a tím vytváří energeticky bohatý povrch. Tato energie je klíčová v procesech jako adheze nebo smáčivost. Vyšší volná povrchová energie zpravidla znamená lepší smáčivost a schopnost spojení s jinými materiály. Volná povrchová energie pevných látek ovlivňuje procesy smáčení a rozlévání [2]. Tyto vlastnosti mají v řadě průmyslových aplikací zásadní význam jako například při přenášení barvy na potiskovaný substrát nebo aplikaci nátěrových hmot.

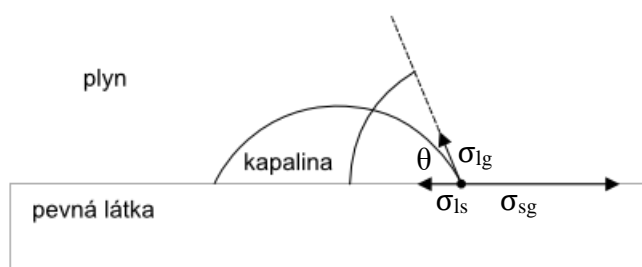
Volná povrchová energie ( $\gamma$ ) materiálů, která se udává v jednotkách  $\text{J/m}^2$ , se skládá ze dvou hlavních složek: disperzní a polární [3]. Disperzní složka, označovaná jako  $\gamma_s^D$ , je spojena s disperzními interakcemi mezi molekulami. Jedná se o univerzální složku, která je přítomna u všech materiálů, protože disperzní síly působí mezi všemi atomy a molekulami. Tato složka je obvykle méně citlivá na chemické modifikace povrchu, i když její hodnota se může mírně měnit vlivem změn topografie nebo složení povrchu. Polární složka, označovaná jako  $\gamma_s^P$ , vyjadřuje přítomnost specifických interakcí, jako jsou dipól-dipólové síly, vodíkové vazby a další polární vazebné mechanismy. Tato složka je výrazně ovlivněna fyzikálně/chemickou úpravou povrchu, například koronovým výbojem, který generuje polární chemické skupiny, jako jsou hydroxylové, karbonylové nebo esterové skupiny [3]. Zvýšení polární složky povrchové energie vede ke zlepšení smáčivosti a adhezních vlastností povrchu, což je klíčové pro aplikace, kde je požadována vysoká přilnavost, například při nanášení barev, nátěrů nebo lepidel.

Zdroje [4, 5] uvádí, že povrchové napětí kapalin ( $\sigma$ ) je také klíčovým faktorem, který ovlivňuje smáčivost, rozprostření a adhezi, což je zásadní pro tiskové technologie a dokončovací procesy. Na molekulární úrovni je výsledkem kohezních sil, které uvnitř kapaliny působí rovnoměrně, zatímco na povrchu dochází k nerovnováze, což vede k minimalizaci povrchu kapaliny a vzniku pružné blány. Při zvětšování povrchu kapaliny se molekuly přesouvají z objemu na povrch, což vyžaduje práci na překonání kohezních sil. Povrchové napětí kapalin, udávané v  $\text{mN/m}$ , odpovídá hustotě této energie a vyjadřuje sílu působící na jednotkovou délku povrchu kapaliny.

## 1.2 Metody měření volné povrchové energie a kontaktní úhel

Kontaktní úhel  $\theta$  je úhel, který vzniká mezi tečnou k povrchu kapky kapaliny a pevným povrchem v bodě, kde se stýkají tři fáze: pevná látka, kapalina a plyn [2, 4]. Tento úhel je ukazatelem smáčivosti povrchu, tedy schopnosti kapaliny rozprostřít se napevném materiálu. Velikost kontaktního úhlu (Obrázek 1) závisí na rovnováze povrchových napětí mezi jednotlivými fázemi, což vyplývá z Young-Duprého rovnice (Rovnice 1). Pokud je kontaktní úhel menší než  $90^\circ$ , kapalina dobře smáčí povrch a má tendenci se po něm rozprostřít. Naopak, pokud je úhel větší než  $90^\circ$ , kapalina povrch nesmáčí a vytváří kapky sférického tvaru.

$$\sigma_{sv} = \sigma_{sl} + \sigma_{lv} \times \cos \theta \quad (1)$$



Obrázek 1: Kontaktní úhel ( $\theta$ ) a mezipovrchová napětí ( $\sigma_{ls}$ ,  $\sigma_{sg}$  a  $\sigma_{lg}$ ) u kapky kapaliny na pevném povrchu [4]

Jak je zmíněno ve zdroji [6], existuje několik typů kontaktních úhlů, které se liší podle způsobu měření a dynamiky kapky na povrchu. *Statický kontaktní úhel* je měřen na nehybné kapce kapaliny na pevném povrchu. *Dynamický kontaktní úhel* je úhel, který se mění v čase a může být ovlivněn změnami v povrchovém napětí kapaliny, povrchové energii substrátu nebo obojím. *Dynamické úhly* zahrnují postupný kontaktní úhel: úhel vytvořený, když kapalina pomalu postupuje po povrchu. *Rovnovážný kontaktní úhel* je úhel vytvořený stacionární kapkou kapaliny na povrchu. Postupné a ustupující úhly jsou nejdůležitějšími rovnovážnými kontaktními úhly, protože představují termodynamickou rovnováhu mezi kapalinou a povrchem. Často však kapka nemůže dosáhnout těchto úhlů kvůli povrchovým nerovnostem nebo částicím prachu. V takových případech je vytvořený kontaktní úhel rovnovážný (kapka se nepohybuje), ale nemá termodynamický význam jako postupný nebo ustupující úhel.

### 1.2.1. Metody měření volné povrchové energie

Neexistuje žádná přímá metoda pro měření volné povrchové energie u pevných látek, jelikož přímé měření volné povrchové energie není možné, a proto se využívají nepřímé metody založené na měření kontaktního úhlu mezi kapalinou a pevným povrchem [2]. Jak již bylo

zmíněno, měření jsou založena na Youngově rovnici (1), která vyjadřuje rovnováhu sil na třífázovém rozhraní pevná látka-kapalina-plyn [4].

### Fowkesova metoda

Jednou z prvních a nejpoužívanějších metod měření volné povrchové energie je Fowkesova metoda, která dělí volnou povrchovou energii na dvě složky: disperzní ( $\gamma_s^D$ ) a polární ( $\gamma_s^P$ ) [2]. Disperzní složka zahrnuje interakce vyplývající z Londonových disperzních sil, zatímco polární složka zohledňuje síly jako dipól-dipólové interakce a vodíkové vazby. Fowkes navrhl, že celková volná povrchová energie  $\gamma_s$  je dána součtem polárních a disperzních složek (Rovnice 2).

$$\gamma_s = \gamma_s^D + \gamma_s^P \quad (2)$$

Tato metoda využívá měření kontaktního úhlu kapky kapaliny na povrchu pevné látky [7]. Nejprve se pomocí čistě disperzní kapaliny (například diiodmethanu) stanoví disperzní složka povrchové energie pevné látky, poté se použije kapalina s polárními vlastnostmi (například voda) pro určení polární složky.

### Owens-Wendt-Rabel-Kaelble metoda

Metoda Owens-Wendt-Rabel-Kaelble (OWRK) navazuje na základní principy, které vycházejí z Fowkesovy a Zismanovy metody (bude popsána dále). Metoda měření volné povrchové energie metodou OWRK je standardní postup pro stanovení volné povrchové energie pevných látek, který vychází z měření kontaktního úhlu mezi povrchem pevné látky a několika kapalinami s předem známými vlastnostmi [8]. Jak již bylo zmíněno u Fowkesovy metody, tak i metoda OWRK rozděluje povrchovou energii na dvě složky a to disperzní a polární. Spojením přístupu vícesložkových interakcí s definicí mezifázového napětí podle Gooda a Girifalca lze mezifázové napětí v rámci teorie OWRK zapsat jako Rovnici 3 [9].

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

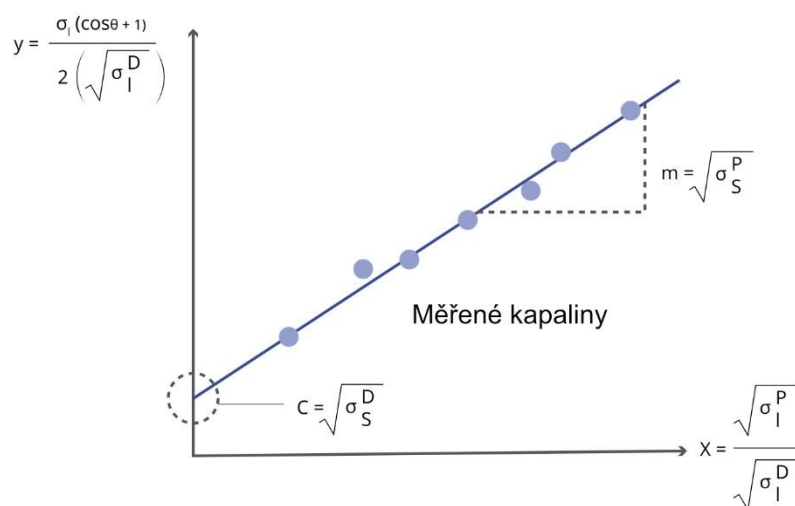
Pokud Rovnici (3) zkombinujeme s Youngovou (1), vznikne vztah známý jako rovnice OWRK, která je zde uvedena jako Rovnice 4 [9].

$$\gamma_l(1 + \cos \theta) = 2 \times \left( \sqrt{\gamma_s^D \times \gamma_l^D} + \sqrt{\gamma_s^P \times \gamma_l^P} \right) \quad (4)$$

Ve zdroji [9] se dále uvádí, že při výběru měřicích kapalin by měla být jedna kapalina s dominantní polární složkou a druhá s dominantní disperzní složkou. To je důležité, protože

interakce probíhají mezi podobnými složkami. Pokud bychom použili pouze disperzní kapalinu, možné polární interakce by zůstaly nezaznamenány. Jako polární kapaliny lze použít vodu, glycerol a formamid; jako disperzní pak diiodmethan a  $\alpha$ -bromnaftalen. Nejčastěji se používají voda a diiodmethan. Voda je dobrou volbou díky své vysoké polární složce, dostupnosti a netoxické povaze. Volba disperzní kapaliny je složitější, protože většina dostupných disperzních kapalin má velmi nízké povrchové napětí, což vede k velmi malým (nulovým) kontaktním úhlům na většině povrchů. Z tohoto důvodu je třeba použít specifitější měřicí kapaliny. Metoda Owens-Wendt-Rabel-Kaelble (OWRK) využívá lineární regresi ve tvaru  $y = mx + c$ , kde závislost mezi hodnotami  $y$ , které jsou vypočítány dle vztahu  $\frac{\sigma_l(\cos \theta + 1)}{2\sqrt{\sigma_l^D}}$

a  $x$ , kde je to poměr  $\sqrt{\frac{\sigma_l^P}{\sigma_l^D}}$  umožňuje stanovit disperzní a polární složky volné povrchové energie pevného povrchu. Ukázka vynesení měřicích kapalin do grafu pro stanovení polární a disperzní složky volné povrchové energie je vyobrazeno na Obrázku 2.

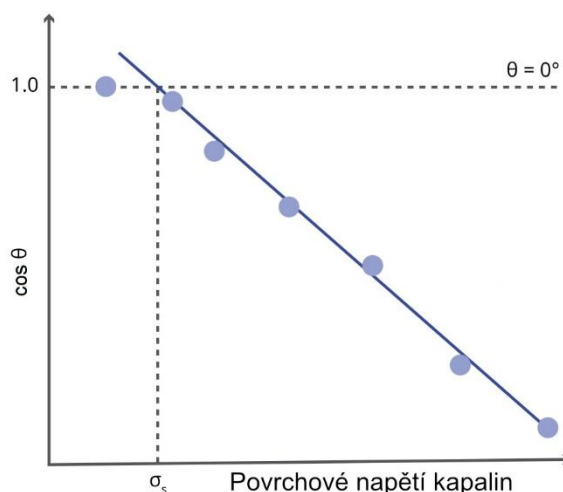


Obrázek 2: Grafické znázornění závislosti kontaktního úhlu na povrchovém napětí použitých kapalin podle metody OWRK [10]

## Zismanova metoda

Zismanův model je jednou z nejzákladnějších a nejčastěji používaných metod pro výpočet volné povrchové energie [10]. Tento model předpokládá, že volná povrchová energie pevné látky je rovna maximálnímu povrchovému napětí kapaliny, která na povrchu vytvoří kontaktní úhel  $0^\circ$ . Tato hodnota je známá jako kritické povrchové napětí. Při využití této metody se kontaktní úhel, vyjádřený jako  $\cos \theta$ , pro řadu různých kapalin vynáší proti jejich povrchovému

napětí (viz Obrázek 3). Následně se graf extrapoluje až do bodu, kde  $\cos \theta = 1$ , což odpovídá kontaktnímu úhlu  $0^\circ$ . V tomto bodě je povrchové napětí kapaliny rovno volné povrchové energii pevné látky. Jelikož Zismanův model nezohledňuje vliv polárních interakcí, je vhodný pouze pro nepolární povrchy, například polyethylen. U polárních povrchů je nutné využít model, který zohledňuje polární interakce. Stanovení kritického bodu, jak je uvedeno ve zdroji [11], je často interpretováno jako volná povrchová energie pevné látky. Na základě této rovnosti se volná povrchová energie často stanovuje pomocí testovacích inkoustů. Z řady kapalin s definovaným povrchovým napětím se hledá ta, která zcela smáčí pevný povrch. Nicméně tato rovnost může být zpochybněna, protože Zismanova metoda nezohledňuje povahu interakcí mezi jednotlivými fázemi. Podle metod Fowkese a OWRK, které rozlišují mezi polární a disperzní složkou povrchového napětí, je kritické povrchové napětí  $\gamma_s$  stejné jako volná povrchová energie u nepolárních materiálů.



Obrázek 3: Určení kritického povrchového napětí  $\sigma_s$  pomocí Zismanovy metody [10]

### Další metody měření volné povrchové energie

Další metodou pro stanovení volné povrchové energie materiálů může být například metoda Wu, která je popsána ve zdroji [12]. Tato metoda vychází taktéž z Youngovy rovnice (1). Aby bylo možné vypočítat volnou povrchovou energii metodou Wu z kontaktního úhlu podle Rovnice (5), je nutné určit druhou neznámou proměnnou, mezifázové napětí  $\sigma_{sl}$ . Na základě Fowkesovy metody se mezifázové napětí  $\sigma_{sl}$  vypočítává z hodnot povrchových napětí  $\sigma_s$  a  $\sigma_l$  a podobných interakcí mezi fázemi. Tyto interakce jsou interpretovány jako harmonický průměr disperzní složky  $\sigma^D$  a polární složky  $\sigma^P$  volné povrchové energie nebo povrchového napětí.

$$\sigma_{sl} = \sigma_l + \sigma_s - 4 \times \left( \frac{\sigma_l \times \sigma_s^D}{\sigma_l^D + \sigma_s^D} + \frac{\sigma_l^P \times \sigma_s^P}{\sigma_l^P + \sigma_s^P} \right) \quad (5)$$

Pro určení volné povrchové energie pevné látky jsou zapotřebí alespoň dvě kapaliny se známými disperzními a polárními složkami povrchového napětí, přičemž alespoň jedna z těchto kapalin musí mít polární složku větší než 0 [12].

Další metodou měření volné povrchové energie je metoda acidobazické interakce, která vychází z Lewisovy teorie kyselin a zásad [13]. Tato metoda předpokládá, že polární interakce nastávají, když elektronový akceptor ( $\sigma^+$ ) interaguje s elektronovým donorem ( $\sigma^-$ ). Mezifázové napětí  $\sigma_{sl}$  se v této metodě vypočítává na základě povrchových napětí  $\sigma_s$  a  $\sigma_l$ , přičemž interakce mezi fázemi jsou interpretovány jako geometrický průměr disperzní složky  $\sigma^D$  a odpovídajících kyselých složek  $\sigma^+$  a bazických složek  $\sigma^-$  povrchového napětí nebo volné povrchové energie podle Rovnice (6). Geometrický průměr se tvoří z těchto vzájemně opačných složek. Pro určení volné povrchové energie pevné látky jsou zapotřebí alespoň tři kapaliny: jedna čistě disperzní kapalina a dvě kapaliny se známými kyselými a bazickými složkami. Ve všech případech by měla být použita voda jako neutrální bod na Lewisově škále.

$$\sigma_{sl} = \sigma_s + \sigma_l - 2 \times \left( \sqrt{\sigma_l^D \times \sigma_s^D} + \sqrt{\sigma_l^- \times \sigma_s^+} + \sqrt{\sigma_l^+ \times \sigma_s^-} \right) \quad (6)$$

Alternativní, jednodušší metodou stanovení volné povrchové energie je použití testovacích inkoustů nebo fixů (Obrázek 4) se známými hodnotami povrchového napětí (norma ISO 8296) [14]. Tato metoda je založena na vizuálním hodnocení chování nanesené linky inkoustu na povrchu testovaného materiálu. Fixy a inkousty jsou vhodné pro rychlou kontrolu volné povrchové energie po úpravách povrchu, jako je plazmová nebo koronová úprava. Inkoust s definovaným povrchovým napětím se aplikuje v podobě souvislé čáry. Pokud linka zůstane neporušená po dobu dvou až čtyř sekund, předpokládá se, že volná povrchová energie materiálu je rovna nebo vyšší než hodnota použitého inkoustu. Naopak, pokud se linka během této doby rozpadne do jednotlivých kapek, je energie povrchu nižší než hodnota uvedená pro daný inkoust. Postupným zkoušením inkoustů s různými hodnotami se určí hodnota inkoustu s nejvyšší hodnotou povrchového napětí, jehož linka zůstává stabilní – tato hodnota je považována za hodnotu volné povrchové energie materiálu.



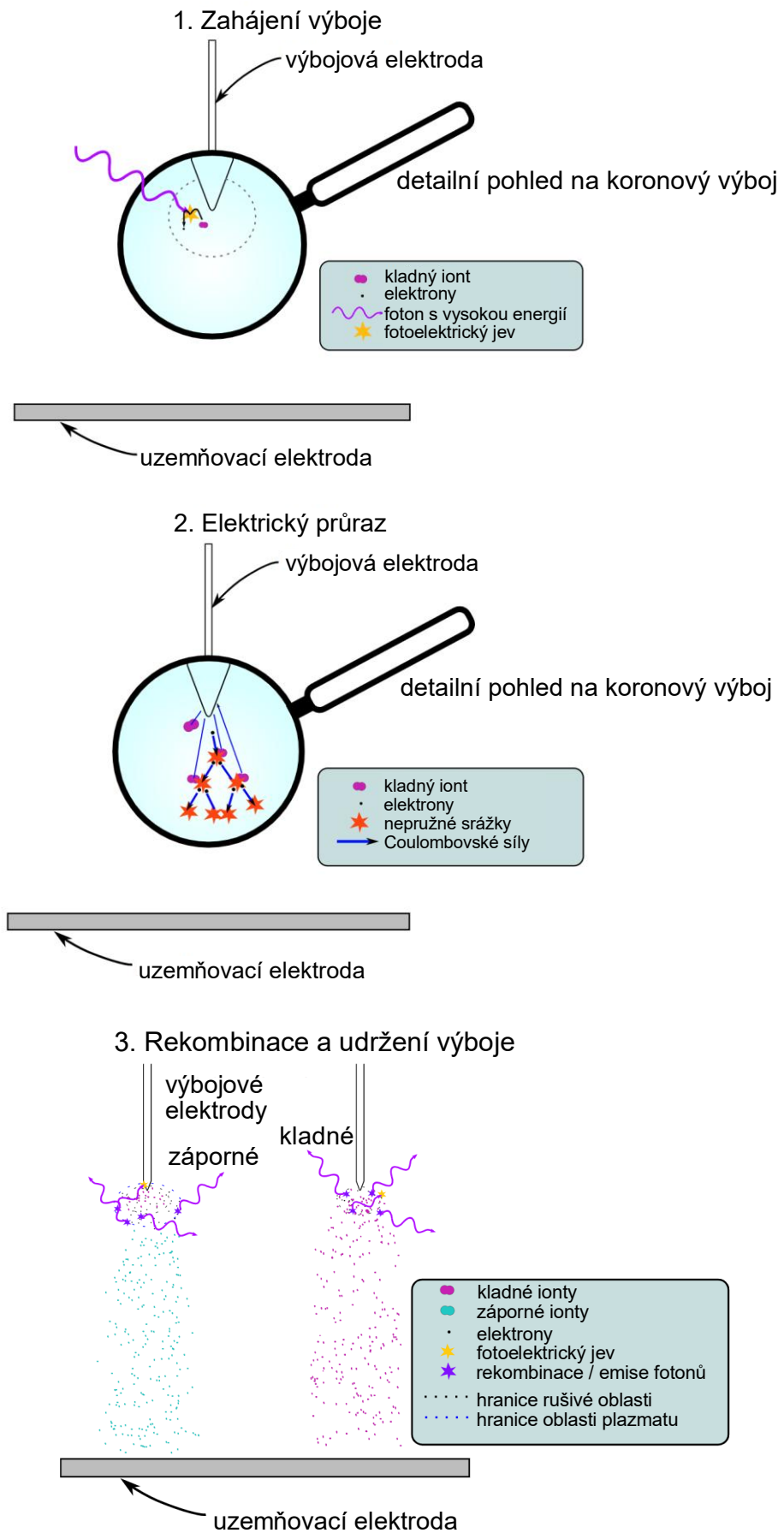
Obrázek 4: Testovací inkousty a fixy o známém povrchovém napětí značky Arcotest [15]

### 1.3 Úprava povrchu materiálu pro zvýšení volné povrchové energie

Povrchové úpravy, jak je zmíněno ve zdroji [16], a které budou popsány dále, jsou klíčové technologie pro zvýšení adheze na neporézních materiálech, jako jsou polymery. Tyto úpravy zvyšují volnou povrchovou energii materiálu, což zlepšuje jejich smáčivost a umožňuje rovnoměrnější nanášení inkoustů či lepidel. Tyto metody se běžně využívají např. v obalovém průmyslu, při tisku, při výrobě elektroniky apod., kde je vysoká přilnavost materiálů klíčová.

#### 1.3.1 Úprava volné povrchové energie materiálu pomocí koronového výboje

Koronový výboj, jak je zmíněno ve zdroji [17], je specifický typ elektrického výboje, který vzniká v prostředí s vysokým napětím a silně nehomogenním elektrickým polem, typicky v okolí ostrých hran nebo hrotů vodičů. Tento jev nastává, když intenzita elektrického pole dosáhne kritické hodnoty, při níž dochází k ionizaci okolního plynu. Proces ionizace zahrnuje uvolnění elektronů z molekul plynu, které jsou následně urychlovány elektrickým polem. Tyto elektrony při nárazech ionizují další molekuly, čímž se vytváří plazma doprovázená emisí světla a chemickou aktivitou (Obrázek 5) [18]. Koronový výboj je klíčový pro úpravu materiálů s nízkou povrchovou energií, jako jsou polyethylen nebo polypropylen [17]. Tyto materiály mají přirozeně neporézní a chemicky inertní povrch, který je obtížné smáčet nebo na něj nanášet nátěry. Díky koronové úpravě dochází ke změně povrchové struktury, která zlepšuje smáčivost a přilnavost těchto materiálů.



Obrázek 5: Znárodnění principu koronového výboje (upraveno z [18])

Koronovací zařízení jsou navržena k využití vysokofrekvenčních výbojů generovaných rozdílem potenciálů v prostoru vyplněném plynem, například vzduchem [19]. Tyto výboje ionizují okolní atmosféru a vytvářejí plazmu, která vyzařuje modrofialové světlo. Povrch materiálu, umístěného mezi elektrodami, je ovlivňován interakcí s ionizovaným vzduchem. Elektrony s vysokou kinetickou energií narušují molekulární vazby polymerů, což vede k tvorbě radikálů. Tyto radikály podporují oxidaci, výsledkem čehož jsou funkční skupiny jako hydroxylové ( $-OH$ ), karbonylové ( $-C=O$ ), karboxylové ( $-COOH$ ) a esterové ( $-COO-$ ), zlepšující smáčivost a adhezi. Tento proces mění pouze vrchní vrstvy materiálu, obvykle do hloubky maximálně 10 nm. Během výboje dochází také k produkci ozonu ( $O_3$ ), jehož množství závisí na výkonu generátoru, složení plynného prostředí a relativní vlhkosti. Ozon a další reaktivní částice mohou způsobovat drobná povrchová poškození, například mikropraskliny. Účinnost úpravy je určena výkonem zařízení, vzdáleností mezi elektrodami a dobou expozice. Upravený povrch vykazuje změnu povrchové energie, přičemž tato změna je na straně bližší vysokonapěťové elektrodě. Tento proces je důležitý v průmyslových aplikacích, zejména pak při přípravě povrchů polymerů pro tisk, lepení a nanášení nátěrů.

### **1.3.2 Úprava volné povrchové energie materiálu pomocí plazmy**

Plazmová úprava, jak je zmíněno ve zdroji [20], je pokročilá technologie úpravy povrchů polymerů, která se využívá k modifikaci fyzikálních a chemických vlastností materiálů. Ačkoli koronový výboj a plazmová úprava povrchu využívají podobných principů ionizace plynu, jedná se o rozdílné technologie. Koronový výboj je typem nerovnoměrného elektrického výboje, při kterém vzniká nízkoteplotní plazma v těsné blízkosti elektrod, přičemž ionizace probíhá za atmosférického tlaku a bez přítomnosti specifických plynů. Výsledkem jsou převážně polární funkční skupiny obsahující kyslík (např. hydroxylové, karbonylové), které zvyšují smáčivost povrchu. Naproti tomu plazmová úprava probíhá buď v řízené atmosféře, nebo ve vakuu, často s použitím aktivních technických plynů (např. argon, dusík, kyslík). Umožňuje vytvoření širší škály funkčních skupin (včetně dusíkatých či aminových) a lépe kontrolovaný průběh reakce. Plazmové prostředí je stabilnější a homogennější, což se odráží ve vyšší reprodukovatelnosti výsledků a možnosti jemněji ovlivňovat chemické i morfologické vlastnosti povrchu. Tato metoda zahrnuje aplikaci ionizovaného plynu, který interaguje s povrchem materiálů a mění jeho vlastnosti na molekulární úrovni. Plazmové úpravy jsou realizovány jak ve vakuu, tak za atmosférického tlaku, přičemž každá z těchto metod nabízí své specifické výhody a aplikační možnosti. Atmosférická plazma, jako například APNEP (Atmospheric Pressure Non-Equilibrium Plasma), umožňuje zpracování povrchů polymerů při

běžném tlaku, čímž eliminuje potřebu drahého vakuového zařízení [20]. Tato metoda je obzvláště účinná při aplikacích, kde je požadována změna povrchové energie a zlepšení smáčivosti. Při aplikaci atmosférické plazmy dochází k oxidaci povrchu polymeru a tvorbě nových funkčních skupin, jako jsou hydroxylové ( $-OH$ ) a karboxylové ( $-COOH$ ) skupiny, které zvyšují polaritu povrchu. Experimentální studie ukázaly, že tyto změny vedou ke zlepšení adheze polymerů, jako je polyethylen a polyethyltereftalát, zejména při použití adhezivních vrstev nebo při potisku povrchu. Na druhou stranu vakuová plazma probíhá za nízkých tlaků a umožňuje přesnější kontrolu nad procesními podmínkami, jako je energie elektronů nebo koncentrace iontů. Tato metoda je ideální pro precizní aplikace, jako je čištění povrchů od kontaminantů, zvýšení jejich drsnosti nebo nanášení ochranných vrstev. Například výzkum ve zdroji [21] prokázal, že vakuová plazma může vytvořit jemné struktury na povrchu polymerů, které podporují mechanické kotvení při spojování materiálů. Kromě toho bylo zjištěno, že vakuová plazma může dosáhnout vyššího stupně oxidace povrchu ve srovnání s atmosférickou plazmou, což přináší výhody v aplikacích, kde je klíčová pevnost spojů.

Studie zaměřené na modifikaci povrchů polymerů také ukazují, že zlepšení adhezivních vlastností silně závisí na smáčivosti povrchu [22]. Experimenty s různými polymery, jako je polyethylen, polystyren a polyethyltereftalát ukázaly, že optimální kontaktní úhel pro zlepšení adheze je přibližně  $70^\circ$ . Tento úhel představuje rovnováhu mezi hydrofilními a hydrofobními vlastnostmi povrchu. Při dosažení tohoto kontaktního úhlu dochází k maximální adhezi, zatímco při vyšších nebo nižších hodnotách kontaktního úhlu adhezní schopnost povrchu klesá. Tento jev byl pozorován u plazmových úprav prováděných jak atmosférickými, tak vakuovými systémy. Z hlediska biomedicínských aplikací byla plazmová úprava polymerů využita ke zlepšení adheze buněk na povrchu materiálů [22]. Studie [22] provedené na polyethylenu a dalších polymerech ukázaly, že plazmová úprava může zvýšit adhezi díky zlepšené smáčivosti a tvorbě funkčních skupin. Kromě chemických změn povrchu dochází ke změně jeho topografie, což přispívá ke zvýšení celkové plochy, na kterou se mohou buňky vázat. Tyto změny zvyšují biokompatibilitu materiálů a podporují jejich využití v lékařství, například při výrobě implantátů.

### **1.3.3 Úprava volné povrchové energie materiálu pomocí plamene**

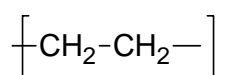
Úprava povrchu pomocí plamene je metoda využívaná ke zlepšení adhezivních vlastností polymerních materiálů, jako jsou polyethylen a polypropylen, zvýšením jejich volné povrchové energie [23]. Tento proces spočívá v krátkém vystavení materiálu oxidujícímu plameni, který na povrchu vytváří funkční skupiny, například hydroxylové ( $-OH$ ), karbonylové ( $C=O$ )

a karboxylové (–COOH). Tyto skupiny zlepšují smáčivost povrchu a podporují lepší přilnavost nátěrů, lepidel či inkoustů. Během ošetření plamenem dochází k oxidaci povrchu polymeru do hloubky několika nanometrů, přičemž oxidace probíhá ve specifických zónách plamene. V hlavní reakční zóně plamene, která má nejvyšší teplotu (například u propanového plamene až 2000 °C), se vytváří reaktivní radikály, které přispívají k povrchové modifikaci. Tato zóna je klíčová pro efektivní aktivaci povrchu materiálu.

Jak je zmíněno ve zdroji [23], výhody této metody zahrnují rychlost, nízkou energetickou náročnost a možnost zpracování složitých tvarů. Úprava plamenem nachází uplatnění například v obalovém průmyslu, při výrobě plastových dílů nebo v elektronice. Důležitým aspektem je správné nastavení parametrů procesu, jako je vzdálenost plamene od povrchu, poměr vzduchu a hořícího plynu, nebo rychlost zpracování, aby bylo dosaženo optimálních výsledků bez poškození materiálu.

#### 1.4 Polyethylen

Polyethylen (PE) je lehký a všestranně využívaný polymerní materiál, který se vyrábí polymerací ethylenu [24]. Hodnoty volné povrchové energie PE se pohybují nejčastěji v rozsahu 30–35 mJ/m<sup>2</sup> [25]. Jak je zmíněno ve zdroji [24], tento materiál patří do významné skupiny polyolefinů a představuje nejrozšířenější plast na světě. Díky svým jedinečným vlastnostem a širokému spektru použití se polyethylen stal nedílnou součástí moderního průmyslu. Jeho aplikace zahrnují výrobu průhledných potravinových fólií, nákupních tašek, lahví na detergenty, palivových nádrží automobilů a dalších produktů. Na Obrázku 6 je vyobrazen strukturní vzorec polyethylenu (PE).



Obrázek 6: Strukturní vzorec polyethylenu (PE)

Polyethylen se obvykle rozděluje do několika kategorií na základě jeho hustoty a molekulární struktury [24]. Nízkohustotní polyethylen (LDPE) se vyrábí z ethylenu za velmi vysokých tlaků a teplot v přítomnosti oxidačních iniciátorů. Tento proces vede k vytvoření polymeru s rozvětvenou strukturou, která mu dodává pružnost a průhlednost. Díky těmto vlastnostem se LDPE široce používá při výrobě fólií, plastových sáčků a izolací vodičů. Tento materiál nachází uplatnění zejména tam, kde je vyžadována snadná manipulace a odolnost proti vlhkosti. Lineární nízkohustotní polyethylen (LLDPE) má podobné vlastnosti jako LDPE, avšak jeho struktura obsahuje lineární řetězec s krátkými větvemi, které jsou umístěny na hlavním řetězci.

Tento polymer se vyrábí kopolymerací ethylenu s dalšími monomery, jako je 1-butén, 1-hexen a 1-okten, za použití pokročilých katalyzátorů. Díky tomu je LLDPE ideálním materiálem pro výrobu obalů, například průtažných fólií, které poskytují vynikající pevnost a flexibilitu. Vysokohustotní polyethylen (HDPE) je lineární verze polyethylenu, která se vyrábí při nižších teplotách a tlacích. Výroba tohoto materiálu zahrnuje použití Ziegler-Nattových nebo metallocenových katalyzátorů, případně aktivovaného oxidu chromitého. HDPE je pevný, tuhý a odolný materiál, který je široce používán při výrobě lahví, potrubí, nákupních tašek a dalších produktů, kde je vyžadována vysoká pevnost a trvanlivost. Tento materiál je zvláště vhodný pro aplikace, které vyžadují dlouhodobou stabilitu a odolnost vůči chemikáliím. Ultra-vysokomolekulární polyethylen (UHMWPE) představuje speciální kategorii tohoto polymeru. Díky extrémně dlouhým molekulárním řetězcům vykazuje tento materiál výjimečnou pevnost a odolnost proti opotřebení. UHMWPE se používá především v lékařských aplikacích, například při výrobě kloubních náhrad, a v průmyslových odvětvích, kde je vyžadována mimořádná mechanická odolnost.

Polyethylen je termoplastický materiál, což znamená, že při zahřátí měkne a lze jej snadno tvarovat do různých forem [24]. Tento materiál je odolný vůči vlhkosti a většině chemikálií, což z něj činí ideální volbu pro balení potravin a chemikálií. Jeho vlastnosti lze dále upravovat změnou hustoty a struktury, což umožňuje vytvořit produkty s různými vlastnostmi, od flexibilních fólií až po pevné konstrukční díly. Polyethylen si díky své všestrannosti, nízké výrobní ceně a užitným vlastnostem udržuje klíčovou roli v průmyslu i každodenním životě. Jeho schopnost kombinovat lehkost, pevnost, chemickou odolnost a snadnou recyklovatelnost jej činí nepostradatelným materiálem pro současné i budoucí technologie.

## **1.5 Výsledky studií zabývajících se volnou povrchovou energií polyethylenu**

Ve studii [26] byla zkoumána změna volné povrchové energie polyethylenu upraveného koronovým výbojem v různých časových intervalech. Vzorčky polyethylenové fólie byly upraveny v koronovacím zařízení s výkonem 800 W a byly podrobeny třem průjezdům koronovací hlavy. Měření volné povrchové energie bylo prováděno pomocí metody Owens, Wendt, Rabel a Kaelble (OWRK) s využitím měření kontaktních úhlů čtyř různých kapalin, (destilovaná voda, ethylenglykol, formamid a diiodmethan). Ihned po úpravě došlo k nárůstu volné povrchové energie na přibližně 40 mJ/m<sup>2</sup> u strany, která nebyla z výroby upravena. Dvě hodiny po úpravě byl pozorován mírný pokles hodnot volné povrchové energie, po pěti hodinách byl pokles přibližně 5 mJ/m<sup>2</sup>. Po jednom měsíci od koronování se hodnoty volné

povrchové energie vrátily na hodnoty blízkým těm před úpravou. Vzorčky byly skladovány při pokojové teplotě.

Ve zdroji [27] byla zkoumána změna volné povrchové energie polyethylenu ošetřeného kyslíkovou plazmou v závislosti na stárnutí v různých atmosférách, konkrétně ve vodě, suchém dusíku a hexanu. Měření bylo prováděno pomocí kontaktních úhlů a hodnoty volné povrchové energie byly měřeny pomocí metody OWRK. Výsledky ukázaly, že volná povrchová energie polyethylenu se po plazmové úpravě zvýšila ze 32,3 na 48,4 mJ/m<sup>2</sup>. Stárnutí materiálu v různých atmosférách mělo na volnou povrchovou energii významný vliv. U vzorků stárnoucích ve vodě docházelo k dalšímu nárůstu povrchové energie, což bylo vysvětleno orientací polárních skupin směrem k vodní fázi. Naopak vzorky stárnoucí v dusíku a hexanu vykazovaly pokles volné povrchové energie, přičemž pokles byl výraznější u vzorků v hexanu.

V práci [28], byla PE fólie upravena nízkotlakým plazmovým výbojem v kyslíkové atmosféře s cílem zvýšit smáčivost a adhezní vlastnosti. Po úpravě došlo k výraznému nárůstu volné povrchové energie, přičemž maximální hodnota 68,8 mJ/m<sup>2</sup> byla zaznamenána po 30 minutách expozice. Stabilita takto upraveného povrchu však není trvalá a vlivem stárnutí dochází k postupné hydrofobní obnově povrchu. Změna volné povrchové energie byla hodnocena nepřímo pomocí změny kontaktních úhlů. Po jednom týdnu skladování vykazovaly vzorky zřetelný nárůst kontaktních úhlů. Například u vzorku ošetřeného po dobu 2 minut se kontaktní úhel glycerolu zvýšil z původních 51° na 73°, což odpovídá poklesu povrchové energie přibližně na 35–40 mJ/m<sup>2</sup>. U delších expozic, např. 20 minut, byl nárůst kontaktního úhlu mírnější – z 51° na 67°, což odpovídá poklesu energie na cca 45–50 mJ/m<sup>2</sup>.

## **2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST**

### **2.1 Polyethylenová fólie**

#### **Polyethylenová fólie GRANOTEN® O**

Fólie s názvem GRANOTEN je produktem společnosti Granitol a je vyrobena z nízkohustotního polyethylenu (LDPE). Jedná se o jednovrstvý, nesmršťovací materiál o tloušťce 60  $\mu\text{m}$  [29]. Fólie umožňuje potisk až deseti barvami a vykazuje tepelnou odolnost v rozmezí od  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Primárně se tato fólie využívá pro balení výrobků, které nevyžadují tepelné smrštění – typicky se jedná o hygienické produkty z papíru (např. toaletní papír, papírové utěrky), ale i o balení briquet nebo uhlí. Uplatnění nachází rovněž v oblasti polygrafie, například při laminaci.

### **2.2 Testovací kapaliny**

Pro měření kontaktních úhlů na vzorcích z PE fólie byly použity čtyři různé kapaliny, a to destilovaná voda, ethylenglykol, formamid a diiodmethan.

#### **Ethylenglykol, bezvodý**

Bezvodý ethylenglykol je kapalina bez chuti a bez zápachu, s molární hmotností 62,07 g/mol [30]. Využívá se ve výrobě kosmetiky, detergentů, barev, rozpouštědel a plastů. Uplatnění má také v nemrznoucích směsích. V této práci byl použit ethylenglykol s čistotou 99,8 % [31] od společnosti MERCK.

#### **Formamid**

Formamid je bezbarvá, kapalná organická sloučenina s typickým zápachem podobným amoniaku [32]. Používá se zejména při syntéze léčiv. Molární hmotnost formamidu je 45,04 g/mol. V této práci byl použit formamid s čistotou minimálně 99,5 % od společnosti MERCK.

#### **Dijodmethan ReagentPlus®**

Třetí testovanou kapalinou byl diiodmethan. Díky obsahu jódu má hnědavé zabarvení a charakteristický zápach [33]. Při měření byl použit diiodmethan s čistotou 99 % a molární hmotností 267,84 g/mol od společnosti MERCK.

## **2.3 Testovací fixy a inkousty**

Před samotným měřením kontaktního úhlu pomocí výše zmíněných kapalin bylo pro předběžné testování volné povrchové energie využito testovacích fixů a inkoustů značky Arcotest. Tyto fixy a inkousty pracují s kapalinami o známém povrchovém napětí. Použita byla varianta BLUE. Tyto fixy a kapaliny jsou klasifikovány jako toxické, a při manipulaci s nimi je nutná zvýšená opatrnost [34]. Ilustrace modrých fixů a inkoustů je uvedena na Obrázku 4. Všechny produkty splňují normy DIN 53364 a ISO 8296. Pro testování materiálů byly použity testovací fixy BLUE arcotest® [34] v rozmezí hodnot povrchového napětí 28–46 mN/m (10 ks, krok 2 mN/m). Přesnost měření je 1 mN/m. Dále byly použity testovací inkousty BLUE arcotest® v rozmezí povrchového napětí 28–44 mN/m s krokem 2 mN/m. Přesnost měření je oproti fixám 0,5 mN/m [34]. Inkousty byly nanášeny na materiál pomocí vatových tyčinek.

## **2.4 Použité přístroje a vybavení**

V rámci experimentální části práce byly pro úpravu materiálu a měření volné povrchové energie využity následující přístroje.

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

Zařízení Lab Treator ASL 400 TUM od firmy Ahlbrandt (Obrázek 7) bylo použito pro koronovou úpravu PE fólie. Přístroj je vybaven koronovací jednotkou se dvěma keramickými elektrodami, jejíž rychlost pohybu nad upravovaným substrátem lze měnit. Úprava probíhá tak, že koronovací jednotka přejíždí nad vzorkem, který je připevněn k hliníkové základně stolu sloužící jako protielektroda. V této práci byla rychlost pohybu koronovací jednotky nastavena na 10 m/min a výkon korony na 800 W. Přístroj umožňuje nastavení výkonu v rozmezí 400–800 W s krokem 50 W. Vzhledem k tomu, že je při úpravě povrchu produkován ozón, je zajištěno odsávání vzduchu v okolí elektrod. Z tohoto důvodu je nutné fólii důkladně fixovat ke stolu koronovacího zařízení, aby nedošlo k jejímu posunu či přisátí k elektrodám.



Obrázek 7: Koronovací zařízení Lab Treator ASL 400 TUM (vlevo) a stříkačka SETonic (vpravo)

#### 2.4.2 Mikrostríkačka SETonic

Pro aplikaci kapek testovacích kapalin na PE byla využita mikrostríkačka značky SETonic (Obrázek 7), která umožňuje ve spolupráci s přístrojem OCA 50 přesné dávkování kapalin.

#### 2.4.3 Přístroj OCA 50 pro měření kontaktního úhlu

Zařízení OCA 50 (Obrázek 8) je automatizovaný přístroj určený pro měření kontaktního úhlu, smáčivosti a následné výpočty volné povrchové energie pevných látek [35]. Součástí přístroje je ovládací panel pro přesné polohování mikrostríkačky, nastavitelný vzorkovací stolek (ve směru osy x, y, z), objektiv s možností zaostřování, nastavitelný pozorovací úhel

a videokamera, která je připojena přes USB port. Přístroj je ovládán softwarem SCA20. V této práci byl použit model výpočtu pomocí přisedlé kapky – kamera zachytí tvar kapky po dopadu na materiál, snímek je následně zpracován v softwaru a je vypočítán kontaktní úhel.



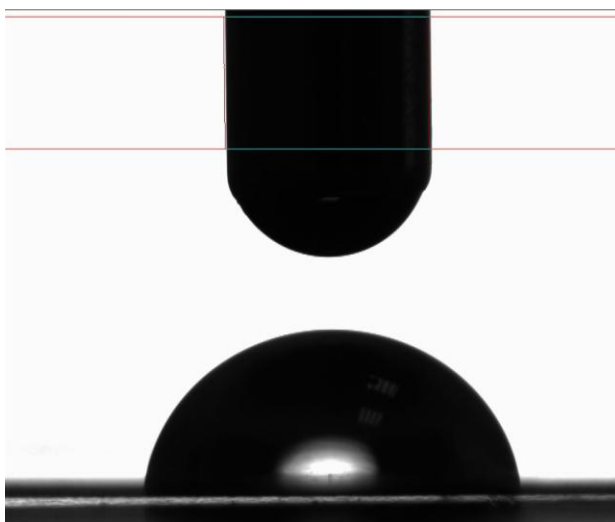
Obrázek 8: Zařízení OCA50 pro měření kontaktních úhlů

## 2.5 Úprava PE fólie a postup měření volné povrchové energie

Měření volné povrchové energie bylo prováděno jak na neupravené PE fólii, tak na fólii ošetřené korunou. Úprava fólie koronovacím zařízením a její první měření proběhlo 4. 11. 2024, přičemž poslední měření bylo provedeno 1. 4. 2025.

Úprava fólie korunou probíhala ze strany, která nebyla z výroby upravena (má nižší hodnotu volné povrchové energie), pomocí zařízení ASL 400 TUM. Nastavený výkon činil 800 W a rychlost pohybu koronovací jednotky byla nastavena na 10 m/min. Při úpravě PE fólie projela koronovací jednotka nad materiálem dvakrát (vždy pohyb tam a zpět do výchozí pozice). Fólie byla před úpravou nastříhána na pásy o rozměrech 30 × 10 cm, které byly nejprve očištěny ethanolem a poté přilepeny na všech obvodových stranách pomocí lepicí pásky na stůl koronovacího zařízení. Po úpravě byly z těchto pásek vystřiženy menší vzorky o velikosti přibližně 1 × 10 cm, přičemž stříh probíhal kolmo k pohybu koronovací hlavy. Stejný postup stříhu byl dodržen i u neupravené fólie. Kapky testovacích kapalin, které byly měřeny po dopadu na upravený nebo neupravený polyetylen pomocí metody přisedlé kapky, byly natahovány do mikrostříkačky SETonic o objemu 500  $\mu$ l. Před každým použitím byly stříkačky důkladně propláchnuty testovanou kapalinou pro eliminaci kontaminace kapalin a zkreslení

výsledků. Vzorčky fólie upravené korunou byly vloženy do zařízení OCA 50 a následně byla na jejich povrch nanášena testovací kapalina ve formě kapky. Při měření kontaktních úhlů se pracovalo s kapkami o objemu přibližně 3  $\mu\text{l}$ . Aby bylo dosaženo této velikosti, byl v softwaru SCA20 nastaven objem vytlačované kapaliny na 5  $\mu\text{l}$ , čímž se docílilo požadovaného objemu kapky právě 3  $\mu\text{l}$  na povrchu PE fólie. Po nanášení kapky na povrch fólie bylo nutné několik sekund vyčkat, než se tvar kapky ustálil (viz Obrázek 9). Následně bylo pomocí přístroje a softwaru SCA20 provedeno měření kontaktního úhlu. Během jednoho měření bylo pro každou kapku pořízeno 12 snímků (nastavena rychlost snímání 1 snímek za sekundu). Data byla poté exportována do předem připravené tabulky v Excelu, kde došlo k výpočtu průměrné hodnoty kontaktního úhlu. Software vyhodnocuje pro každý snímek hodnotu kontaktního úhlu levé i pravé strany kapky (Obrázek 9) a jejich průměr. Pro každý vzorek byly použity minimálně tři kapky pro zvýšení přesnosti měření. Stejný postup byl opakován pro každou kapalinu.



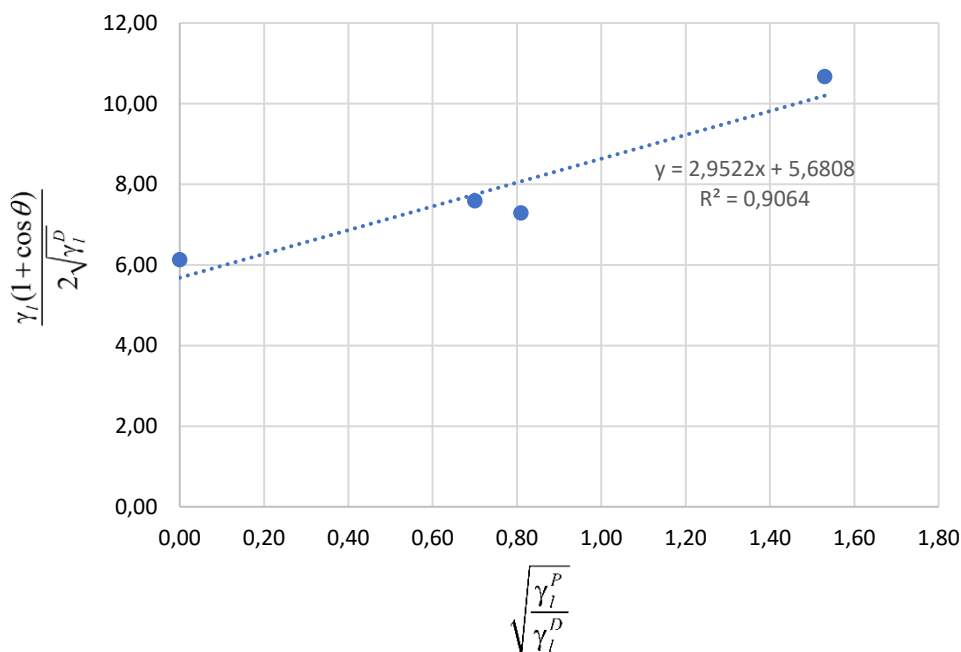
Obrázek 9: Snímání ustálené kapky kapaliny v programu SCA20

Výpočet volné povrchové energie byl prováděn v prostředí Microsoft Excel s využitím metody Owens–Wendt–Rabel–Kaelble (OWRK). Pro každou jednotlivou kapku bylo zaznamenáno dvanáct hodnot kontaktních úhlů průměrné hodnoty levého a pravého kontaktního úhlu každého snímku kapky, ze kterých byla následně stanovena průměrná hodnota. Tento postup byl aplikován minimálně na tři kapky (na každém proužku PE fólie – 1  $\times$  10 cm) od každé ze čtyř použitých testovacích kapalin. Každé měření volné povrchové energie (před úpravou koronovacím zařízením nebo po úpravě v konkrétní časové prodlevě) bylo prováděno vždy na 4 proužcích PE fólie (1  $\times$  10 cm) a každý proužek byl vyhodnocen zvlášť (viz Příloha na konci práce, kde jsou všechny výsledky uvedeny). Měření byla prováděna na straně, která nebyla z výroby nijak upravena, neupravená strana od výrobce měla volnou povrchovou energii

$<28 \text{ mJ/m}^2$  (stanoveno pomocí testovacích fixů a inkoustů firmy Arcotest) a upravená strana  $34 \text{ mJ/m}^2$ . Metoda OWRK využívá lineární funkce ( $y = mx + c$ ), což umožňuje využití lineární regrese při zpracování více testovacích kapalin. Upravená rovnice ve formě přímky (rovnice 7) zahrnuje kontaktní úhel  $\theta$ , celkové povrchové napětí kapaliny a její disperzní a polární složky. Po dosažení těchto údajů byly vypočítány hodnoty  $x$  a  $y$ , které odpovídají jednotlivým členům upravené rovnice – levá strana rovnice představuje hodnotu  $y$ , zatímco  $\sqrt{\frac{\gamma_l^P}{\gamma_l^D}}$  odpovídá hodnotě  $x$ .

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

Pro výpočet  $y$  je nutné znát kontaktní úhel  $\theta$ , celkové povrchové napětí testovací kapaliny ( $\gamma_l$ ) a jeho disperzní složku ( $\gamma_l^D$ ). K určení hodnoty  $x$  je pak zapotřebí znalost polární ( $\gamma_l^P$ ) a disperzní složky ( $\gamma_l^D$ ) dané kapaliny. Všechny vypočtené dvojice  $x$  a  $y$  pro 4 testované kapaliny byly znázorněny graficky (viz Obrázek 10) a následně proloženy lineární regresní přímkou. Směrnice této přímky ( $m$ ) odpovídá odmocnině polární složky volné povrchové energie pevného materiálu a hodnota ( $c$ ) reprezentuje odmocninu disperzní složky. Sečtením druhých mocnin těchto složek byla získána výsledná hodnota celkové volné povrchové energie. Výpočet byl proveden samostatně pro upravenou tak neupravenou stranu PE fólie.



Obrázek 10: Ukázka grafického vyhodnocení metody OWRK pro testovaný vzorek z 28. 11. 2024. Vyhodnocení ihned po úpravě korunou a skladování při 10 °C

## 2.6 Výsledky a diskuze

V této části práce jsou prezentovány výsledky měření volné povrchové energie polyethylenové fólie získané metodou měření kontaktního úhlu čtyř kapalin a následně vyhodnocené pomocí OWRK modelu. Měření jsou rozdělena do dvou hlavních skupin – fólie bez úpravy a fólie upravené koronovým výbojem. U vzorků s provedenou úpravou byla sledována změna volné povrchové energie v čase, a to při třech různých teplotách skladování: 10 °C, pokojová teplota a 40 °C. Pro každou variantu byly provedeny dvě na sobě nezávislé série měření, které umožnily posoudit opakovatelnost výsledků a případnou variabilitu v rámci práce. Výsledky volné povrchové energie jsou uvedeny v Tabulkách 1–7 a diskutovány z hlediska vlivu koronové úpravy, doby skladování a teplotních podmínek na stabilitu dosažené povrchové úpravy. Podrobněji jsou pak výsledky měření uvedeny v Přílohách na konci práce.

### 2.6.1 Výsledky měření neupravené polyethylenové fólie

Měření volné povrchové energie neupravené polyethylenové fólie byla realizována ve třech samostatných sériích. První série proběhla dne 4. 11. 2024, zatímco druhá a třetí série byla provedena ve stejný den, a to 12. 3. 2025. Cílem bylo ověřit výchozí hodnoty volné povrchové energie PE fólie bez koronové úpravy a současně zhodnotit rozptyl mezi jednotlivými měřeními.

Výsledky jednotlivých sérií jsou uvedeny v Tabulce 1. U prvního měření (A) ze dne 4. 11. 2024 byla průměrná hodnota volné povrchové energie 25,5 mJ/m<sup>2</sup>. U druhého (B) a třetího (C) měření ze dne 12. 3. 2025 byly naměřeny průměrné hodnoty volné povrchové energie 26,2 a 26,1 mJ/m<sup>2</sup>. Z výsledků je patrné, že rozdíly mezi jednotlivými sériemi jsou minimální a hodnoty se pohybují v podobném rozmezí (viz výběrová směrodatná odchylka, Tabulka 1), což potvrzuje stabilitu volné povrchové energie neupraveného materiálu a dobrou opakovatelnost měření. Hodnoty všech měření, ze kterých byly počítány průměrné hodnoty volné povrchové energie uvedené v Tabulce 1, jsou uvedeny v Příloze 1 na konci této práce.

*Tabulka 1: Průměrné hodnoty volné povrchové energie ( $\gamma_s$ ) včetně hodnot polárních ( $\gamma_s^p$ ) a disperzních ( $\gamma_s^d$ ) složek upravené PE fólie skladované při pokojové teplotě a výběrová směrodatná odchylka ( $s$ )*

Měření	$\gamma_s^p$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s^d$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]
A	2,0	23,5	25,5	0,9
B	2,2	24,0	26,2	0,7
C	1,7	24,4	26,1	0,6

## 2.6.2 Změna volné povrchové energie PE fólie po úpravě koronou v čase skladovaná při pokojové teplotě

Za účelem sledování časové stability upraveného povrchu byla PE fólie skladována při pokojové teplotě a byla podrobena dvěma samostatným sériím měření. První série probíhala od 4. 11. 2024 do 1. 4. 2025, druhá série pak od 5. 12. 2024 do 1. 4. 2025. V každé sérii byly odebrány vzorky v několika časových intervalech – od měření ihned po úpravě až po období více než 4 měsíců.

V 1. sérii měření (Tabulka 2) byla volná povrchová energie po úpravě koronou 42,0 mJ/m<sup>2</sup>. Po dvou hodinách od koronování nedošlo k poklesu volné povrchové energie (hodnota 42,2 mJ/m<sup>2</sup>) a rozdíl je způsoben chybou měření (viz směrodatná odchylka). Po 4 hodinách od koronování ukázala volná povrchová energie výraznější pokles na 37,2 mJ/m<sup>2</sup>. Po jednom dni, které je v Tabulce 2 uvedeno jako měření D, došlo k dalšímu výraznějšímu poklesu na 31,7 mJ/m<sup>2</sup>, což představuje pokles o více než 10 mJ/m<sup>2</sup> oproti výchozí hodnotě po koronování. Další pokles volné povrchové energie byl nevýrazný a významnější úbytek byl zaznamenán až poslední měření ze dne 1. 4. 2025, kdy byla naměřena volná povrchová energie u PE fólie 28,5 mJ/m<sup>2</sup>. Celkový trend tak ukazuje na poměrně výraznou ztrátu efektu koronové úpravy v čase, zejména během prvního dne po koronování.

Tabulka 2: Průměrné hodnoty volné povrchové energie ( $\gamma_s$ ) včetně hodnot polárních ( $\gamma_s^P$ ) a disperzních ( $\gamma_s^D$ ) složek upravené PE fólie skladované při pokojové teplotě a výběrová směrodatná odchylka ( $s$ ). První série měření (4. 11. 2024 – 1. 4. 2025)

Měření	$\gamma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	Poznámka
A	3,9	38,1	42,0	0,4	Ihned po úpravě
B	12,4	29,8	42,2	0,6	2 hod. po úpravě
C	6,8	30,4	37,2	0,6	4 hod. po úpravě
D	2,9	28,8	31,7	0,3	1. den po úpravě
E	2,8	29,5	32,3	0,2	7. den po úpravě
F	1,9	28,2	30,1	0,9	21. den po úpravě
G	3,2	28,7	31,9	0,2	31. den po úpravě
H	3,2	28,4	31,6	0,4	71. den po úpravě
I	2,5	26,0	28,5	0,7	148. den po úpravě

Druhá série měření (Tabulka 3) začala o měsíc později, přičemž výchozí hodnota volné povrchové energie po úpravě koronou byla nižší – 39,4 mJ/m<sup>2</sup>. Pokles však následoval obdobně jako v sérii první s výjimkou 2 hodin po úpravě. Po dvou hodinách se hodnota snížila na 35,5 mJ/m<sup>2</sup>, po čtyřech hodinách dosáhla 35,0 mJ/m<sup>2</sup> a po jednom dni již klesla na 29,4 mJ/m<sup>2</sup>.

Nejnižší hodnota byla zaznamenána na konci sledovaného období (necelé 4 měsíce od koronování), a to 27,5 mJ/m<sup>2</sup>.

*Tabulka 3: Průměrné hodnoty volné povrchové energie ( $\gamma_s$ ) včetně hodnot polárních ( $\gamma_s^P$ ) a disperzních ( $\gamma_s^D$ ) složek upravené PE fólie skladované při pokojové teplotě a výběrová směrodatná odchylka (s). Druhá série měření (5. 12. 2024 – 1. 4. 2025)*

Měření	$\gamma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	s [mJ/m <sup>2</sup> ]	Poznámka
A	10,1	29,3	39,4	0,7	Ihned po úpravě
B	7,0	28,5	35,5	0,7	2 hod. po úpravě
C	6,6	28,4	35,0	0,2	4 hod. po úpravě
D	1,5	27,9	29,4	0,6	1. den po úpravě
E	2,0	26,9	28,9	0,3	7. den po úpravě
F	2,3	26,5	28,8	0,2	13. den po úpravě
G	1,8	26,0	27,8	0,4	40. den po úpravě
H	1,7	26,0	27,7	0,4	62. den po úpravě
I	1,7	25,8	27,5	0,6	117. den po úpravě

Rozdíly mezi sériemi byly patrné především v počáteční hodnotě volné povrchové energie po koronování, kde byl rozdíl 2,6 mJ/m<sup>2</sup> a dále v prvních hodinách po koronování, kdy dochází k výraznější reorientaci nově vytvořených funkčních skupin. Tabulka 3 dále dobře ukazuje, jak po koronování dojde k navýšení polární složky volné povrchové energie a k jejímu následnému poklesu v čase. Hodnota polární složky u neupravené PE fólie (viz Tabulka 1) se pohybovala okolo 2 mJ/m<sup>2</sup>. Tento trend je vidět i v dalších Tabulkách 4–7 pro následující měření při jiných teplotách. Směrodatné odchylky se u většiny měření pohybovaly v rozmezí 0,2 až 0,7 mJ/m<sup>2</sup>, což ukazuje na dobrou opakovatelnost výsledků měření. Veškeré hodnoty měření volných povrchových energií vzorků uvedených v Tabulce 2 a 3 včetně jejich polárních a disperzních složek jsou uvedeny v Příloze 2 a Příloze 3.

### **2.6.3 Změna volné povrchové energie PE fólie po úpravě koronou v čase skladované při 10 °C**

Pro sledování vlivu nižší teploty na časovou stabilitu/změnu volné povrchové energie koronové úpravy byla část vzorků skladována při teplotě 10 °C (vzorky umístěny v lednici). I v tomto případě byla provedena dvě samostatná měření, opět označená jako první a druhá série. První

série probíhala od 28. 11. 2024 do 1. 4. 2025, druhá série od 5. 12. 2024 do stejného koncového data. Měřilo se celkem v osmi časových intervalech podobně jako při pokojové teplotě.

V první sérii měření (Tabulka 4) byla bezprostředně po koronové úpravě zaznamenána hodnota volné povrchové energie 40,8 mJ/m<sup>2</sup>. Již po dvou hodinách poklesla hodnota na 38,0 mJ/m<sup>2</sup> a po čtyřech hodinách na 33,3 mJ/m<sup>2</sup>. Po jednom dni byla hodnota volné povrchové energie 32,7 mJ/m<sup>2</sup>, přičemž v následujících týdnech a měsících pokles pokračoval výrazně pomalejším tempem. Po sedmi dnech od koronování byla hodnota 32,5 mJ/m<sup>2</sup>, po čtrnácti dnech 32,0 mJ/m<sup>2</sup> a nejnižší hodnota byla zaznamenána u posledního měření – 28,2 mJ/m<sup>2</sup> po čtyřech měsících od koronování

Tabulka 4: Průměrné hodnoty volné povrchové energie ( $\gamma_s$ ) včetně hodnot polárních ( $\gamma_s^P$ ) a disperzních ( $\gamma_s^D$ ) složek upravené PE fólie skladované při 10 °C a výběrová směrodatná odchylka ( $s$ ). První série měření (28. 11. 2024 – 1. 4. 2025)

Měření	$\gamma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	Poznámka
A	10,9	30,0	40,8	0,6	Ihned po úpravě
B	5,4	32,6	38,0	1,0	2 hod. po úpravě
C	2,0	31,3	33,3	0,6	4 hod. po úpravě
D	2,2	30,5	32,7	0,7	1. den po úpravě
E	2,3	30,2	32,5	0,7	7. den po úpravě
F	3,1	28,9	32,0	0,3	14. den po úpravě
G	3,3	26,2	29,5	0,4	47. den po úpravě
H	3,5	26,2	29,7	0,8	69. den po úpravě
I	3,2	25,0	28,2	0,8	124. den po úpravě

Ve druhé sérii měření (Tabulka 5) byla výchozí hodnota volné povrchové energie vyšší a to 42,2 mJ/m<sup>2</sup>. Po dvou hodinách od koronování činila hodnota 41,3 mJ/m<sup>2</sup>, ale už po čtyřech hodinách od koronování pouze 33,7 mJ/m<sup>2</sup>, což odpovídá podobnému trendu jako v první sérii měření. Následující hodnoty byly: 32,8 mJ/m<sup>2</sup> po jednom dni, 33,1 mJ/m<sup>2</sup> po týdnu a 32,2 mJ/m<sup>2</sup> po čtrnácti dnech. Po jednom a půl měsíci se hodnota snížila na 29,9 mJ/m<sup>2</sup>, po dvou měsících na 29,7 mJ/m<sup>2</sup> a v posledním měření byla zaznamenána hodnota 28,6 mJ/m<sup>2</sup>.

Tabulka 5: Průměrné hodnoty volné povrchové energie ( $\gamma_s$ ) včetně hodnot polárních ( $\gamma_s^P$ ) a disperzních ( $\gamma_s^D$ ) složek upravené PE fólie skladované při 10 °C a výběrová směrodatná odchylka (s). Druhá série měření (5. 12. 2024 – 1. 4. 2025)

Měření	$\gamma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	s [mJ/m <sup>2</sup> ]	Poznámka
A	12,3	29,9	42,2	0,5	Okamžitě po úpravě
B	11,0	30,3	41,3	0,7	2 hod. po úpravě
C	2,6	31,1	33,7	0,6	4 hod. po úpravě
D	1,9	30,9	32,8	0,6	1. den po úpravě
E	1,8	31,2	33,1	0,5	7. den po úpravě
F	4,6	27,6	32,2	0,2	13. den po úpravě
G	3,6	26,3	29,9	0,5	40. den po úpravě
H	3,4	26,3	29,7	0,7	62. den po úpravě
I	3,5	25,1	28,6	0,6	117. den po úpravě

Průběh obou sérií byl velmi podobný. Rozdíly mezi odpovídajícími časovými intervaly (od 4 hodin dále) se pohybovaly většinou v řádu několika desetin mJ/m<sup>2</sup>, výjimku tvoří první dvě hodnoty, kde byly zaznamenány vyšší rozdíly. Směrodatné odchylky se pohybovaly v rozmezí 0,2 až 1,0 mJ/m<sup>2</sup>. Větší směrodatné odchylky byly naměřeny v počáteční fázi sledování změny volné povrchové energie po koronování, kdy je pokles volné povrchové energie nejvýraznější. Z dat je zřejmé, že při teplotě 10 °C nedochází k pomalejšímu poklesu volné povrchové energie po koronování, než tomu bylo u pokojové teploty. Opět je zde patrný výrazný pokles v průběhu prvního dne po koronování a následný velmi pomalý pokles v dalších týdnech. Veškeré hodnoty měření volných povrchových energií vzorků uvedených v Tabulce 4 a 5 včetně jejich polárních a disperzních složek jsou uvedeny v Příloze 4 a Příloze 5.

#### 2.6.4 Změna volné povrchové energie PE fólie po úpravě koronou v čase skladované při 40 °C

Další fází experimentální práce bylo sledování chování povrchově upravené PE fólie při teplotě 40 °C. I zde byla provedena dvě měření – první série byla zahájena 14. 1. 2025, druhá série 15. 1. 2025. Hodnoty volné povrchové energie byly zaznamenávány v podobných časových intervalech jako při ostatních teplotách.

V první sérii měření (Tabulka 6) byla bezprostředně po úpravě koronou naměřena hodnota volné povrchové energie pouze 37,2 mJ/m<sup>2</sup>. Po dvou hodinách klesla na 35,6 mJ/m<sup>2</sup>, po čtyřech hodinách na 34,9 mJ/m<sup>2</sup> a po jednom dni došlo k výraznému poklesu na 31,5 mJ/m<sup>2</sup>. Sedmý den měření ukázal hodnotu 28,7 mJ/m<sup>2</sup>, přičemž další poklesy byly již jen minimální –

například po čtrnácti dnech byla hodnota 28,6 mJ/m<sup>2</sup>, stejně jako po 1,5 měsíci. Nejnižší hodnota byla naměřena v posledním měřeném intervalu, tedy po necelých čtyřech měsících, a činila 27,6 mJ/m<sup>2</sup>.

*Tabulka 6: Průměrné hodnoty volné povrchové energie ( $\gamma_s$ ) včetně hodnot polárních ( $\gamma_s^P$ ) a disperzních ( $\gamma_s^D$ ) složek upravené PE fólie skladované při 40 °C a výběrová směrodatná odchylka (s). První série měření (14. 1. 2025 – 1. 4. 2025)*

Měření	$\gamma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	s [mJ/m <sup>2</sup> ]	Poznámka
A	9,1	28,1	37,2	0,5	Ihned po úpravě
B	6,5	29,1	35,6	0,4	2 hod. po úpravě
C	6,3	28,6	34,9	0,6	4 hod. po úpravě
D	2,2	29,3	31,5	0,4	1. den po úpravě
E	2,4	26,3	28,7	0,3	8. den po úpravě
F	2,3	26,3	28,6	0,3	15. den po úpravě
G	2,3	26,3	28,6	0,4	29. den po úpravě
H	2,1	26,3	28,4	0,4	57. den po úpravě
I	2,3	25,3	27,6	0,5	77. den po úpravě

Ve druhé sérii (Tabulka 7) měření byla výchozí hodnota vyšší a to 39,0 mJ/m<sup>2</sup>. Po dvou hodinách se snížila na 37,8 mJ/m<sup>2</sup>, po čtyřech hodinách na 35,8 mJ/m<sup>2</sup> a po jednom dni na 31,9 mJ/m<sup>2</sup>. Následující hodnoty ukazovaly podobný vývoj jako v sérii první – po týdnu byla hodnota volné povrchové energie 29,9 mJ/m<sup>2</sup>, po dvou měsících 28,1 mJ/m<sup>2</sup> a v závěrečném měření činila 27,8 mJ/m<sup>2</sup>.

*Tabulka 7: Průměrné hodnoty volné povrchové energie ( $\gamma_s$ ) včetně hodnot polárních ( $\gamma_s^P$ ) a disperzních ( $\gamma_s^D$ ) složek upravené PE fólie skladované při 40 °C a výběrová směrodatná odchylka (s). Druhá série měření (15. 1. 2024 – 1. 4. 2025)*

Měření	$\gamma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	s [mJ/m <sup>2</sup> ]	Poznámka
A	12,2	26,8	39,0	0,8	Ihned po úpravě
B	9,8	28,0	37,8	0,8	2 hod. po úpravě
C	8,0	27,8	35,8	0,5	4 hod. po úpravě
D	2,6	29,3	31,9	0,4	1. den po úpravě
E	2,6	27,3	29,9	0,6	7. den po úpravě
F	2,2	26,2	28,4	0,2	14. den po úpravě
G	2,4	26,3	28,7	0,3	28. den po úpravě
H	2,2	25,9	28,1	0,6	56. den po úpravě
I	2,3	25,5	27,8	0,6	76. den po úpravě

Rozdíly mezi oběma sériemi byly patrné hlavně v počáteční fázi. Největší rozdíl se objevil ihned po úpravě, kdy série 2 dosáhla o 1,8 mJ/m<sup>2</sup> vyšší hodnoty než série 1. V dalších časových intervalech se rozdíly mezi sériemi snižovaly a směrodatné odchylky se většinou pohybovaly

v rozmezí 0,3 do 0,8 mJ/m<sup>2</sup>. Celkový vývoj ukazuje, že při teplotě 40 °C dochází k rychlejšímu poklesu volné povrchové energie ve srovnání s nižšími teplotami (změna zejména mezi 1. a 7. dnem po koronování). Významný je obecně opět pokles hodnot volné povrchové energie během prvního dne po úpravě. Skladování za vyšší teploty vede k rychlejší reorientaci polárních skupin směrem do objemu polymeru a po jednom týdnu od koronování je volná povrchová energie PE nižší než 30 mJ/m<sup>2</sup>. Přesto však i po zhruba 4 měsících zůstává nepatrně vyšší (okolo 1 mJ/m<sup>2</sup>) než tomu bylo před koronováním. Veškeré hodnoty měření volných povrchových energií vzorků uvedených v Tabulce 6 a 7 včetně jejich polárních a disperzních složek jsou uvedeny v Příloze 6 a Příloze 7.

## ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývala sledováním změn volné povrchové energie polyethylenové fólie v čase po úpravě koronovým výbojem. Cílem bylo vyhodnotit časovou stabilitu povrchové úpravy fólie při různých teplotních podmínkách skladování, a to konkrétně při 10 °C, pokojové teplotě a 40 °C. Měření byla prováděna na fólii z nízkohustotního polyethylenu, přičemž volná povrchová energie byla stanovována na základě kontaktních úhlů metodou přisedlé kapky a výpočtem podle Owens-Wendt-Rabel-Kaelbleovy teorie. Pro každou teplotu byly provedeny dvě nezávislé série měření.

Naměřené hodnoty potvrdily, že koronová úprava zvyšuje volnou povrchovou energii PE fólie, přičemž bezprostředně po úpravě byly dosaženy hodnoty okolo 40 mJ/m<sup>2</sup>. Největší pokles byl zaznamenán již během prvního dne od úpravy, kdy se pokles pohyboval podle vzorku a teploty v rozsahu 6–10 mJ/m<sup>2</sup>. Výsledky dále ukázaly, že průběh změn volné povrchové energie při teplotách 10 °C a pokojové teplotě byl podobný – po počátečním výrazném poklesu v průběhu prvního dne na hodnoty kolem 31,7 mJ/m<sup>2</sup> (pokojová teplota) a 32,7 mJ/m<sup>2</sup> (10 °C) se volná povrchová energie na několik týdnů stabilizovala a pohybovala se na hodnotách naměřených po 1 dni od koronování a další pokles byl velmi pozvolný. Při teplotě 40 °C byl pokles výraznější – již po 7 dnech klesla volná povrchová energie na hodnoty nižší než 30 mJ/m<sup>2</sup>. Největší pokles byl ve všech případech zaznamenán během prvního dne po koronování – například při pokojové teplotě se hodnota snížila z více než 40 mJ/m<sup>2</sup> na zhruba 31,7 mJ/m<sup>2</sup>. Po čtyřech měsících skladování byla hodnota volné povrchové energie všech vzorků skladovaných při různých teplotách stále vyšší než před koronovou úpravou a pohybovala se v rozmezích 27,5 až 28,6 mJ/m<sup>2</sup>. Hodnota volné povrchové energie neupravené PE fólie se pohybovala okolo 26 mJ/m<sup>2</sup>. Z hlediska polární a disperzní složky volné povrchové energie byl po koronování patrný výrazný nárůst polární složky – z původních hodnot okolo 1–2 mJ/m<sup>2</sup> až na 13–14 mJ/m<sup>2</sup>. V čase však tato složka postupně klesala – nejvýrazněji u vzorků skladovaných při 40 °C. Výjimku tvořila jedna měřicí série při 10 °C, u níž byl pokles minimální. Naproti tomu disperzní složka zůstávala po celou dobu skladování relativně stabilní a kolísala/klesala pouze mírně. Směrodatné odchylky u jednotlivých měření se pohybovaly do hodnoty 1 mJ/m<sup>2</sup>, což potvrzuje velmi dobrou opakovatelnost měření a celkovou spolehlivost výsledků. Celkově lze říci, že efekt koronové úpravy má krátkodobý charakter a míra stability této úpravy v závislosti na sledovaných teplotách byla minimální. Vyšší rozdíly byly pozorovány akorát při vyšší teplotě (40 °C), kdy po 7 dnech od koronování byly hodnoty volné povrchové energie nižší než 30 mJ/m<sup>2</sup>.

Součástí této práce mělo být také sledování vlivu vlhkosti na změnu volné povrchové energie upravené PE fólie, avšak z důvodu technické poruchy koronovacího zařízení se tento experiment nepodařilo realizovat. V budoucnu by bylo vhodné doplnit měření o sledování změny volné povrchové energie při různých úrovních relativní vlhkosti, kdy vliv polarity různých prostředí (kapalin) na volnou povrchovou energii uvádí studie [27].

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] What is the Difference Between Surface Free Energy and Surface Energy? Brighton Science [online]. 2021 [cit. 2024-11-10]. Dostupné z: <https://www.brighton-science.com/blog/what-is-the-difference-between-surface-free-energy-and-surface-energy>
- [2] ALTAY, B. N., MA, R., FLEMING, P. D., JOYCE, M. J., ANAND, A., CHEN, T., KESKIN, B., MADDIPATLA, D., TURKANI, V. S., KOTKAR, P. R., FLECK, A., RASHEED, R. A., HE, D. Surface Free Energy Estimation: A New Methodology for Solid Surfaces. *Advanced Materials Interfaces* [online]. 2020, vol. 7, iss. 6 [cit. 2024-11-10]. DOI: 10.1002/admi.201901570
- [3] PASCUAL, M., BALART, R., SÁNCHEZ, L., FENOLLAR, O., CALVO, O. Study of the aging process of corona discharge plasma effects on low density polyethylene film surface. *Journal of Materials Science* [online]. 2008, vol. 43, iss. 14, s. 4901–4909 [cit. 2024-11-10]. DOI: 10.1007/s10853-008-2712-0
- [4] KAPLANOVÁ, M. *Moderní polygrafie*. 1. vydání. Praha: Svaz polygrafických podnikatelů, 2010. ISBN 978-80-254-4230-2.
- [5] NAVRÁTIL, V. Povrchové napětí kapalin, povrchová energie pevných látek – teorie, praxe, škola [online]. [cit. 2024-11-11]. Dostupné z: <https://educoland.muni.cz/fyzika/novinky-z-oboru/povrchove-napeti-kapalin-povrchova-energie-pevnych-latek-teorie-praxe-skola/>
- [6] What is Contact Angle? Brighton Science [online]. [cit. 2024-11-11]. Dostupné z: <https://www.brighton-science.com/what-is-contact-angle>
- [7] Fowkes method. KRÜSS Scientific [online]. [cit. 2024-11-11]. Dostupné z: <https://www.kruss-scientific.com/en/know-how/glossary/fowkes-method>
- [8] Owens, Wendt, Rabel and Kaelble (OWRK) method. KRÜSS Scientific [online]. [cit. 2024-11-11]. Dostupné z: <https://www.kruss-scientific.com/en/know-how/glossary/owens-wendt-rabel-and-kaelble-owrk-method>
- [9] OWRK method – Owens, Wendt, Rabel and Kaelble model. Biolin Scientific [online]. [cit. 2024-11-20]. Dostupné z: <https://www.biolinscientific.com/blog/owrk-method-owens-wendt-rabel-and-kaelble-model>
- [10] Surface Energy: Formula & Definition. Ossila [online]. [cit. 2024-11-18]. Dostupné z: <https://www.ossila.com/pages/a-guide-to-surface-energy#fowkes-model>
- [11] Method according to Zisman. KRÜSS Scientific [online]. [cit. 2024-11-18]. Dostupné z: <https://www.kruss-scientific.com/en/know-how/glossary/method-according-to-zisman>
- [12] Method according to Wu. KRÜSS Scientific [online]. [cit. 2024-11-18]. Dostupné z: <https://www.kruss-scientific.com/en/know-how/glossary/method-according-to-wu>
- [13] Oss and Good method. KRÜSS Scientific [online]. [cit. 2024-11-18]. Dostupné z: <https://www.kruss-scientific.com/en/know-how/glossary/oss-and-good-method>

- [14] Dyne Pens & Test Fluids – How do they work? Dyne Testing [online]. 2016 [cit. 2024-11-19]. Dostupné z: <https://dynetesting.com/2016/12/dyne-pens-test-fluids-how-do-they-work/>
- [15] Arcotest – Fixy a inkousty. Proinex Instruments [online]. [cit. 2024-11-20]. Dostupné z: <https://www.proinex.cz/p/arcotest-fixy-a-inkousty>
- [16] What is Corona and Plasma Surface Treatment? InfinityPV [online]. [cit. 2024-12-28]. Dostupné z: <https://www.infinitypv.com/roll-to-roll-academy/what-is-corona-and-plasma-surface-treatment>
- [17] Why do I need corona treating and how do corona treaters work? Enercon Industries [online]. [cit. 2024-12-28]. Dostupné z: <https://www.enerconind.com/web-treating/library-resource/why-do-i-need-corona-treating-and-how-does-it-work>
- [18] What is the Corona Effect in Transmission Lines? How Engineers Overcome it? AllumiaX [online]. [cit. 2024-12-28]. Dostupné z: <https://www.allumiax.com/blog/what-is-the-corona-effect-in-transmission-lines-how-engineers-overcome-it>
- [19] IZDEBSKA, J., THOMAS, S. Printing on Polymers: Fundamentals and Applications [online]. 1st ed. Oxford: William Andrew, 2016, s. 123–142. ISBN 978-0-323-37468-2 [cit. 2024-12-29]. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=IjROBQAAQBAJ>
- [20] SHENTON, M. J., STEVENS, G. C. Surface modification of polymer surfaces: atmospheric plasma versus vacuum plasma treatments. *Journal of Physics D: Applied Physics* [online]. 2001, vol. 34, iss. 18, s. 2754–2761 [cit. 2025-01-03]. DOI: 10.1088/0022-3727/34/18/307
- [21] YASUSHI, T., YOSHITO, I. Cell adhesion to plasma-treated polymer surfaces. *Polymer* [online]. 1993, vol. 34, iss. 10, s. 2208–2211 [cit. 2025-01-06]. DOI: 10.1016/0032-3861(93)90752-V
- [22] CHAN, C.-M., KO, T.-M., HIRAOKA, H. Polymer surface modification by plasmas and photons. *Surface Science Reports* [online]. 1996, vol. 24, iss. 1–2, s. 1–54 [cit. 2025-01-06]. DOI: 10.1016/0167-5729(96)80003-3
- [23] MAZZOLA, L., CUSMA, A. Flame Treatment of Polymeric Materials—Relevance to Adhesion: A Critical Review. *Reviews of Adhesion and Adhesives* [online]. 2014, vol. 2, iss. 4, s. 365–398 [cit. 2025-01-03]. DOI: 10.7569/RAA.2014.097311
- [24] W. L., LOTH, G. Polyethylene (PE). *Encyclopaedia Britannica* [online]. 2009 [cit. 2025-01-14]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/polyethylene>
- [25] ACCUDYNE. Polymer Surface Energy Table. [online]. [cit. 2025-01-14]. Dostupné z: [https://www.accudynetest.com/polytable\\_02.html](https://www.accudynetest.com/polytable_02.html)
- [26] HOLEŇOVÁ, V. Změna volné povrchové energie polyetyleny v čase po úpravě koronou. Pardubice, 2023. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Fakulta chemicko-technologická. Vedoucí práce Bohumil Jašůrek.
- [27] TSUCHIDA, M., OSAWA, Z. Effect of ageing atmospheres on the changes in surface free energies of oxygen plasma-treated polyethylene films. *Colloid and Polymer*

- Science [online]. 1994, vol. 272, iss. 7, s. 770–776 [cit. 2025-01-10]. ISSN 0303-402X. DOI: 10.1007/BF00652417
- [28] SANCHIS, M. R., BLANES, V., BLANES, M., GARCIA, D., BALART, R. Surface modification of low density polyethylene (LDPE) film by low pressure O<sub>2</sub> plasma treatment. European Polymer Journal [online]. 2006, vol. 42, iss. 7, s. 1558–1568 [cit. 2025-01-18]. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2006.01.001
- [29] GRANITOL a. s. Obalové fólie. [online]. [cit. 2025-01-26]. Dostupné z: <https://www.granitol.cz/produkty/obalove-folie/>
- [30] PubChem. Ethylenglykol. National Library of Medicine [online]. [cit. 2025-02-06]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Ethylene-glycol>
- [31] SIGMA-ALDRICH. BEZPEČNOSTNÍ LIST: Ethylenglykol. Sigma Aldrich [online]. 2025 [cit. 2025-02-25]. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/CZ/cs/sds/sial/324558>
- [32] SIGMA-ALDRICH. BEZPEČNOSTNÍ LIST: Formamide. Sigma Aldrich [online]. 2025 [cit. 2025-02-25]. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/CZ/cs/sds/sigma/f9037>
- [33] SIGMA-ALDRICH. BEZPEČNOSTNÍ LIST: Diiodomethane. Sigma Aldrich [online]. 2025 [cit. 2025-02-25]. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/CZ/cs/sds/sial/158429>
- [34] ARCOTEST. Testovací inkousty, Testovací fixy a Příslušenství. Arcotest GmbH [online]. [cit. 2025-02-25]. Dostupné z: <https://arcotest.info/cs/testovaci-fixy/>
- [35] DATAPHYSICS INSTRUMENTS. OCA – Optical contact angle measuring and contour analysis systems. DataPhysics Instruments GmbH [online]. [cit. 2025-03-15]. Dostupné z: <https://www.dataphysics-instruments.com/products/oca/>

## PŘÍLOHY

<b>Příloha 1:</b> Volná povrchová energie ( $\gamma_s$ ) neupravených PE fólií včetně jejich polárních ( $\gamma_s^P$ ) a disperzních ( $\gamma_s^D$ ) složek a výběrových směrodatných odchylek ( $s$ ).....	42
<b>Příloha 2:</b> Volná povrchová energie ( $\gamma_s$ ) PE fólie po úpravě korunou skladovaná při pokojové teplotě včetně její polární ( $\gamma_s^P$ ) a disperzní ( $\gamma_s^D$ ) složky a výběrových směrodatných odchylek $s$ . První série měření (4. 11. 2024 – 1. 4. 2025).....	43
<b>Příloha 3:</b> Volná povrchová energie ( $\gamma_s$ ) PE fólie po úpravě korunou skladovaná při pokojové teplotě včetně její polární ( $\gamma_s^P$ ) a disperzní ( $\gamma_s^D$ ) složky a výběrových směrodatných odchylek $s$ . Druhá série měření (5. 12. 2024 – 1. 4. 2025) .....	45
<b>Příloha 4:</b> Volná povrchová energie ( $\gamma_s$ ) PE fólie po úpravě korunou skladovaná při 10 °C včetně její polární ( $\gamma_s^P$ ) a disperzní ( $\gamma_s^D$ ) složky a výběrových směrodatných odchylek $s$ . První série měření (28. 11. 2024 – 1. 4. 2025) .....	47
<b>Příloha 5:</b> Volná povrchová energie ( $\gamma_s$ ) PE fólie po úpravě korunou skladovaná při 10 °C včetně její polární ( $\gamma_s^P$ ) a disperzní ( $\gamma_s^D$ ) složky a výběrových směrodatných odchylek $s$ . Druhá série měření (5. 12. 2024 – 1. 4. 2025) .....	49
<b>Příloha 6:</b> Volná povrchová energie ( $\gamma_s$ ) PE fólie po úpravě korunou skladovaná při 40 °C včetně její polární ( $\gamma_s^P$ ) a disperzní ( $\gamma_s^D$ ) složky a výběrových směrodatných odchylek $s$ . První série měření (14. 1. 2025 – 1. 4. 2025) .....	51
<b>Příloha 7:</b> Volná povrchová energie ( $\gamma_s$ ) PE fólie po úpravě korunou skladovaná při 40 °C včetně její polární ( $\gamma_s^P$ ) a disperzní ( $\gamma_s^D$ ) složky a výběrových směrodatných odchylek $s$ . První série měření (15. 1. 2025 – 1. 4. 2025) .....	53

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

Měření		$\gamma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]
A	1 (4. 11. 2024)	2,0	22,8	24,8
	2 (4. 11. 2024)	3,0	21,7	24,7
	3 (4. 11. 2024)	1,5	24,8	26,4
	4 (4. 11. 2024)	1,6	24,5	26,2
	<b>Průměr</b>	<b>2,0</b>	<b>23,5</b>	<b>25,5</b>
	<b>s</b>	<b>0,7</b>	<b>1,5</b>	<b>0,9</b>
B	1 (12. 3. 2025)	2,6	22,8	25,3
	2 (12. 3. 2025)	3,0	24,0	27,0
	3 (12. 3. 2025)	1,5	24,8	26,4
	4 (12. 3. 2025)	1,6	24,5	26,2
	<b>Průměr</b>	<b>2,2</b>	<b>24,0</b>	<b>26,2</b>
	<b>s</b>	<b>0,7</b>	<b>0,9</b>	<b>0,7</b>
C	1 (12. 3. 2025)	2,0	25,1	27,1
	2 (12. 3. 2025)	1,7	24,0	25,7
	3 (12. 3. 2025)	2,0	24,0	26,0
	4 (12. 3. 2025)	1,2	24,5	25,8
	<b>Průměr</b>	<b>1,7</b>	<b>24,4</b>	<b>26,1</b>
	<b>s</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>

**Příloha 2:** Volná povrchová energie ( $\gamma_s$ ) PE fólie po úpravě korunou skladovaná při pokojové teplotě včetně její polární ( $\gamma_s^P$ ) a disperzní ( $\gamma_s^D$ ) složky a výběrových směrodatných odchylek (s). První série měření (4. 11. 2024 – 1. 4. 2025)

Měření		$\gamma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]
A	1 (4. 11. 2024)	4,1	37,6	41,7
	2 (4. 11. 2024)	4,9	37,4	42,4
	3 (4. 11. 2024)	3,6	38,1	41,7
	4 (4. 11. 2024)	3,0	39,3	42,3
	<b>Průměr</b>	<b>3,9</b>	<b>38,1</b>	<b>42,0</b>
	<b>s</b>	<b>0,8</b>	<b>0,9</b>	<b>0,4</b>
B	1 (4. 11. 2024)	12,6	29,8	42,4
	2 (4. 11. 2024)	12,4	30,2	42,5
	3 (4. 11. 2024)	12,7	28,6	41,3
	4 (4. 11. 2024)	11,9	30,7	42,5
	<b>Průměr</b>	<b>12,4</b>	<b>29,8</b>	<b>42,2</b>
	<b>s</b>	<b>0,4</b>	<b>0,9</b>	<b>0,6</b>
C	1 (4. 11. 2024)	4,1	33,5	37,6
	2 (4. 11. 2024)	5,4	31,4	36,7
	3 (4. 11. 2024)	10,9	27,1	37,9
	4 (4. 11. 2024)	7,0	29,6	36,7
	<b>Průměr</b>	<b>6,8</b>	<b>30,4</b>	<b>37,2</b>
	<b>s</b>	<b>2,9</b>	<b>2,7</b>	<b>0,6</b>
D	1 (5. 11. 2024)	3,0	29,1	32,1
	2 (5. 11. 2024)	3,0	28,7	31,7
	3 (5. 11. 2024)	2,6	28,8	31,4
	4 (5. 11. 2024)	3,1	28,5	31,6
	<b>Průměr</b>	<b>2,9</b>	<b>28,8</b>	<b>31,7</b>
	<b>s</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>
E	1 (11. 11. 2024)	2,9	29,7	32,6
	2 (11. 11. 2024)	2,5	29,7	32,1
	3 (11. 11. 2024)	2,8	29,5	32,3
	4 (11. 11. 2024)	2,8	29,2	32,0
	<b>Průměr</b>	<b>2,8</b>	<b>29,5</b>	<b>32,3</b>
	<b>s</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>
F	1 (25. 11. 2024)	1,8	29,6	31,4
	2 (25. 11. 2024)	1,7	28,6	30,3
	3 (25. 11. 2024)	2,0	27,4	29,4
	4 (25. 11. 2024)	2,1	27,3	29,3
	<b>Průměr</b>	<b>1,9</b>	<b>28,2</b>	<b>30,1</b>
	<b>s</b>	<b>0,2</b>	<b>1,1</b>	<b>0,9</b>
G	1 (5. 12. 2024)	3,0	28,8	31,8
	2 (5. 12. 2024)	2,7	28,9	31,6
	3 (5. 12. 2024)	3,9	28,2	32,2
	4 (5. 12. 2024)	2,9	28,9	31,9
	<b>Průměr</b>	<b>3,2</b>	<b>28,7</b>	<b>31,9</b>
	<b>s</b>	<b>0,5</b>	<b>0,3</b>	<b>0,2</b>

Měření		$\gamma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]
H	1 (14. 1. 2025)	3,0	28,8	31,8
	2 (14. 1. 2025)	2,7	28,9	31,6
	3 (14. 1. 2025)	3,9	27,0	31,0
	4 (14. 1. 2025)	2,9	28,9	31,9
	<b>Průměr</b>	<b>3,2</b>	<b>28,4</b>	<b>31,6</b>
	<b>s</b>	<b>0,5</b>	<b>0,9</b>	<b>0,4</b>
I	1 (1. 4. 2025)	2,3	27,0	29,3
	2 (1. 4. 2025)	2,7	25,0	27,7
	3 (1. 4. 2025)	2,9	26,0	28,9
	4 (1. 4. 2025)	2,3	26,0	28,3
	<b>Průměr</b>	<b>2,5</b>	<b>26,0</b>	<b>28,5</b>
	<b>s</b>	<b>0,3</b>	<b>0,8</b>	<b>0,7</b>

**Příloha 3:** Volná povrchová energie ( $\gamma_s$ ) PE fólie po úpravě korunou skladovaná při pokojové teplotě včetně její polární ( $\gamma_s^P$ ) a disperzní ( $\gamma_s^D$ ) složky a výběrových směrodatných odchylek (s). Druhá série měření (5. 12. 2024 – 1. 4. 2025)

Měření		$\gamma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]
A	1 (5. 12. 2024)	8,9	31,2	40,2
	2 (5. 12. 2024)	10,9	28,8	39,8
	3 (5. 12. 2024)	11,1	28,0	39,2
	4 (5. 12. 2024)	9,6	29,1	38,7
	<b>Průměr</b>	<b>10,1</b>	<b>29,3</b>	<b>39,4</b>
	<b>s</b>	<b>1,1</b>	<b>1,4</b>	<b>0,7</b>
B	1 (5. 12. 2024)	8,9	27,6	36,5
	2 (5. 12. 2024)	5,0	30,3	35,3
	3 (5. 12. 2024)	7,2	27,9	35,1
	4 (5. 12. 2024)	6,7	28,4	35,2
	<b>Průměr</b>	<b>7,0</b>	<b>28,5</b>	<b>35,5</b>
	<b>s</b>	<b>1,6</b>	<b>1,2</b>	<b>0,7</b>
C	1 (5. 12. 2024)	6,3	28,9	35,2
	2 (5. 12. 2024)	6,4	28,7	35,1
	3 (5. 12. 2024)	7,1	28,0	35,1
	4 (5. 12. 2024)	6,6	28,1	34,7
	<b>Průměr</b>	<b>6,6</b>	<b>28,4</b>	<b>35,0</b>
	<b>s</b>	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>0,2</b>
D	1 (6. 12. 2024)	1,6	27,1	28,7
	2 (6. 12. 2024)	1,6	27,7	29,3
	3 (6. 12. 2024)	1,5	27,9	29,4
	4 (6. 12. 2024)	1,4	28,7	30,1
	<b>Průměr</b>	<b>1,5</b>	<b>27,9</b>	<b>29,4</b>
	<b>s</b>	<b>0,1</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>
E	1 (12. 12. 2024)	1,6	27,1	28,7
	2 (12. 12. 2024)	1,6	27,7	29,3
	3 (12. 12. 2024)	2,2	26,5	28,7
	4 (12. 12. 2024)	2,5	26,4	29,0
	<b>Průměr</b>	<b>2,0</b>	<b>26,9</b>	<b>28,9</b>
	<b>s</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>	<b>0,3</b>
F	1 (18. 12. 2024)	2,2	26,5	28,7
	2 (18. 12. 2024)	2,5	26,4	29,0
	3 (18. 12. 2024)	2,4	26,1	28,5
	4 (18. 12. 2024)	2,2	26,8	29,0
	<b>Průměr</b>	<b>2,3</b>	<b>26,5</b>	<b>28,8</b>
	<b>s</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,2</b>
G	1 (14. 1. 2025)	1,6	25,6	27,2
	2 (14. 1. 2025)	1,9	26,0	27,8
	3 (14. 1. 2025)	1,6	26,2	27,7
	4 (14. 1. 2025)	1,9	26,3	28,2
	<b>Průměr</b>	<b>1,8</b>	<b>26,0</b>	<b>27,8</b>
	<b>s</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>

Měření		$\gamma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]
H	1 (5. 2. 2025)	1,6	25,6	27,2
	2 (5. 2. 2025)	1,8	26,0	27,8
	3 (5. 2. 2025)	1,6	26,2	27,7
	4 (5. 2. 2025)	1,9	26,3	28,2
	<b>Průměr</b>	<b>1,7</b>	<b>26,0</b>	<b>27,7</b>
	<b>s</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>
I	1 (1. 4. 2025)	1,6	25,6	27,2
	2 (1. 4. 2025)	1,9	25,0	26,9
	3 (1. 4. 2025)	1,6	26,2	27,7
	4 (1. 4. 2025)	1,9	26,3	28,2
	<b>Průměr</b>	<b>1,7</b>	<b>25,8</b>	<b>27,5</b>
	<b>s</b>	<b>0,2</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>

**Příloha 4:** Volná povrchová energie ( $\gamma_s$ ) PE fólie po úpravě korunou skladovaná při 10 °C včetně její polární ( $\gamma_s^P$ ) a disperzní ( $\gamma_s^D$ ) složky a výběrových směrodatných odchylek (s). První série měření (28. 11. 2024 – 1. 4. 2025)

Měření		$\gamma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]
A	1 (28. 11. 2024)	8,7	32,3	41,0
	2 (28. 11. 2024)	9,2	30,8	40,0
	3 (28. 11. 2024)	12,7	28,7	41,5
	4 (28. 11. 2024)	12,8	28,1	40,9
	<b>Průměr</b>	<b>10,9</b>	<b>30,0</b>	<b>40,8</b>
	<b>s</b>	<b>2,2</b>	<b>1,9</b>	<b>0,6</b>
B	1 (28. 11. 2024)	5,9	30,7	36,6
	2 (28. 11. 2024)	6,5	31,4	37,9
	3 (28. 11. 2024)	5,1	33,8	38,9
	4 (28. 11. 2024)	4,1	34,2	38,3
	<b>Průměr</b>	<b>5,4</b>	<b>32,6</b>	<b>38,0</b>
	<b>s</b>	<b>1,0</b>	<b>1,7</b>	<b>1,0</b>
C	1 (28. 11. 2024)	2,0	30,8	32,8
	2 (28. 11. 2024)	2,1	31,2	33,3
	3 (28. 11. 2024)	1,5	32,6	34,1
	4 (28. 11. 2024)	2,3	30,8	33,1
	<b>Průměr</b>	<b>2,0</b>	<b>31,3</b>	<b>33,3</b>
	<b>s</b>	<b>0,3</b>	<b>0,9</b>	<b>0,6</b>
D	1 (29. 11. 2024)	1,8	31,3	33,1
	2 (29. 11. 2024)	2,6	29,3	31,8
	3 (29. 11. 2024)	1,8	31,6	33,4
	4 (29. 11. 2024)	2,5	30,0	32,5
	<b>Průměr</b>	<b>2,2</b>	<b>30,5</b>	<b>32,7</b>
	<b>s</b>	<b>0,4</b>	<b>1,1</b>	<b>0,7</b>
E	1 (5. 12. 2024)	1,8	31,3	33,1
	2 (5. 12. 2024)	2,6	29,3	31,8
	3 (5. 12. 2024)	2,6	30,4	33,0
	4 (5. 12. 2024)	2,0	30,0	32,1
	<b>Průměr</b>	<b>2,3</b>	<b>30,2</b>	<b>32,5</b>
	<b>s</b>	<b>0,4</b>	<b>0,8</b>	<b>0,7</b>
F	1 (12. 12. 2024)	2,2	30,1	32,3
	2 (12. 12. 2024)	3,0	28,7	31,7
	3 (12. 12. 2024)	2,2	29,9	32,1
	4 (12. 12. 2024)	5,3	26,9	32,1
	<b>Průměr</b>	<b>3,1</b>	<b>28,9</b>	<b>32,0</b>
	<b>s</b>	<b>1,5</b>	<b>1,5</b>	<b>0,3</b>
G	1 (14. 1. 2025)	4,9	24,7	29,6
	2 (14. 1. 2025)	3,2	26,8	30,0
	3 (14. 1. 2025)	2,4	26,6	29,0
	4 (14. 1. 2025)	2,8	26,7	29,5
	<b>Průměr</b>	<b>3,3</b>	<b>26,2</b>	<b>29,5</b>
	<b>s</b>	<b>1,1</b>	<b>1,0</b>	<b>0,4</b>

Měření		$\gamma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]
H	1 (5. 2. 2025)	4,9	24,7	29,6
	2 (5. 2. 2025)	4,0	26,8	30,8
	3 (5. 2. 2025)	2,4	26,6	29,0
	4 (5. 2. 2025)	2,8	26,7	29,5
	<b>Průměr</b>	<b>3,5</b>	<b>26,2</b>	<b>29,7</b>
	<b>s</b>	<b>1,1</b>	<b>1,0</b>	<b>0,8</b>
I	1 (1. 4. 2025)	3,6	24,0	27,6
	2 (1. 4. 2025)	2,6	26,8	29,4
	3 (1. 4. 2025)	3,2	25,0	28,2
	4 (1. 4. 2025)	3,6	24,0	27,6
	<b>Průměr</b>	<b>3,2</b>	<b>25,0</b>	<b>28,2</b>
	<b>s</b>	<b>0,5</b>	<b>1,3</b>	<b>0,8</b>

**Příloha 5:** Volná povrchová energie ( $\gamma_s$ ) PE fólie po úpravě korunou skladovaná při 10 °C včetně její polární ( $\gamma_s^P$ ) a disperzní ( $\gamma_s^D$ ) složky a výběrových směrodatných odchylek (s). Druhá série měření (5. 12. 2024 – 1. 4. 2025)

Měření		$\gamma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]
A	1 (5. 12. 2024)	13,4	29,0	42,4
	2 (5. 12. 2024)	11,9	30,8	42,7
	3 (5. 12. 2024)	12,0	29,8	41,8
	4 (5. 12. 2024)	11,8	29,9	41,8
	<b>Průměr</b>	<b>12,3</b>	<b>29,9</b>	<b>42,2</b>
	<b>s</b>	<b>0,8</b>	<b>0,8</b>	<b>0,5</b>
B	1 (5. 12. 2024)	11,0	30,2	41,3
	2 (5. 12. 2024)	10,3	31,9	42,2
	3 (5. 12. 2024)	11,5	29,3	40,7
	4 (5. 12. 2024)	11,1	29,7	40,9
	<b>Průměr</b>	<b>11,0</b>	<b>30,3</b>	<b>41,3</b>
	<b>s</b>	<b>0,5</b>	<b>1,1</b>	<b>0,7</b>
C	1 (5. 12. 2024)	3,5	29,8	33,2
	2 (5. 12. 2024)	2,2	31,0	33,1
	3 (5. 12. 2024)	2,8	31,6	34,3
	4 (5. 12. 2024)	2,2	31,9	34,2
	<b>Průměr</b>	<b>2,6</b>	<b>31,1</b>	<b>33,7</b>
	<b>s</b>	<b>0,6</b>	<b>0,9</b>	<b>0,6</b>
D	1 (6. 12. 2024)	1,7	31,2	32,9
	2 (6. 12. 2024)	1,4	32,0	33,4
	3 (6. 12. 2024)	2,6	30,4	33,0
	4 (6. 12. 2024)	2,0	30,0	32,1
	<b>Průměr</b>	<b>1,9</b>	<b>30,9</b>	<b>32,8</b>
	<b>s</b>	<b>0,5</b>	<b>0,9</b>	<b>0,6</b>
E	1 (12. 12. 2024)	1,8	31,6	33,4
	2 (12. 12. 2024)	2,5	30,0	32,5
	3 (12. 12. 2024)	1,7	31,2	32,9
	4 (12. 12. 2024)	1,4	32,0	33,4
	<b>Průměr</b>	<b>1,8</b>	<b>31,2</b>	<b>33,1</b>
	<b>s</b>	<b>0,5</b>	<b>0,9</b>	<b>0,5</b>
F	1 (18. 12. 2024)	5,6	26,4	32,0
	2 (18. 12. 2024)	5,3	26,9	32,1
	3 (18. 12. 2024)	5,5	26,9	32,4
	4 (18. 12. 2024)	2,2	30,1	32,3
	<b>Průměr</b>	<b>4,6</b>	<b>27,6</b>	<b>32,2</b>
	<b>s</b>	<b>1,6</b>	<b>1,7</b>	<b>0,2</b>
G	1 (14. 1. 2025)	4,9	24,7	29,6
	2 (14. 1. 2025)	3,2	26,8	30,0
	3 (14. 1. 2025)	3,8	25,6	29,4
	4 (14. 1. 2025)	2,4	28,2	30,6
	<b>Průměr</b>	<b>3,6</b>	<b>26,3</b>	<b>29,9</b>
	<b>s</b>	<b>1,0</b>	<b>1,5</b>	<b>0,5</b>

Měření		$\gamma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]
H	1 (5. 2. 2025)	4,4	24,7	29,1
	2 (5. 2. 2025)	3,2	26,8	30,0
	3 (5. 2. 2025)	3,6	25,6	29,2
	4 (5. 2. 2025)	2,4	28,2	30,6
	<b>Průměr</b>	<b>3,4</b>	<b>26,3</b>	<b>29,7</b>
	<b>s</b>	<b>0,8</b>	<b>1,5</b>	<b>0,7</b>
I	1 (1. 4. 2025)	4,0	24,0	28,0
	2 (1. 4. 2025)	3,2	25,0	28,2
	3 (1. 4. 2025)	3,8	25,6	29,4
	4 (1. 4. 2025)	2,9	26,0	28,9
	<b>Průměr</b>	<b>3,5</b>	<b>25,1</b>	<b>28,6</b>
	<b>s</b>	<b>0,5</b>	<b>0,9</b>	<b>0,6</b>

**Příloha 6:** Volná povrchová energie ( $\gamma_s$ ) PE fólie po úpravě korunou skladovaná při 40 °C včetně její polární ( $\gamma_s^P$ ) a disperzní ( $\gamma_s^D$ ) složky a výběrových směrodatných odchylek (s). První série měření (14. 1. 2025 – 1. 4. 2025)

Měření		$\gamma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]
A	1 (14. 1. 2025)	9,8	27,5	37,4
	2 (14. 1. 2025)	9,6	28,2	37,8
	3 (14. 1. 2025)	7,8	29,2	37,0
	4 (14. 1. 2025)	9,1	27,5	36,6
	<b>Průměr</b>	<b>9,1</b>	<b>28,1</b>	<b>37,2</b>
	<b>s</b>	<b>0,9</b>	<b>0,8</b>	<b>0,5</b>
B	1 (14. 1. 2025)	6,4	28,8	35,2
	2 (14. 1. 2025)	6,2	29,9	36,1
	3 (14. 1. 2025)	6,9	28,6	35,5
	4 (14. 1. 2025)	6,4	29,1	35,4
	<b>Průměr</b>	<b>6,5</b>	<b>29,1</b>	<b>35,6</b>
	<b>s</b>	<b>0,3</b>	<b>0,6</b>	<b>0,4</b>
C	1 (14. 1. 2025)	6,4	29,0	35,4
	2 (14. 1. 2025)	5,6	29,7	35,3
	3 (14. 1. 2025)	6,1	28,4	34,4
	4 (14. 1. 2025)	7,0	27,2	34,3
	<b>Průměr</b>	<b>6,3</b>	<b>28,6</b>	<b>34,9</b>
	<b>s</b>	<b>0,6</b>	<b>1,1</b>	<b>0,6</b>
D	1 (15. 1. 2025)	2,9	28,2	31,1
	2 (15. 1. 2025)	1,8	29,6	31,4
	3 (15. 1. 2025)	2,3	29,1	31,4
	4 (15. 1. 2025)	1,8	30,3	32,1
	<b>Průměr</b>	<b>2,2</b>	<b>29,3</b>	<b>31,5</b>
	<b>s</b>	<b>0,5</b>	<b>0,9</b>	<b>0,4</b>
E	1 (22. 1. 2025)	2,8	25,9	28,8
	2 (22. 1. 2025)	2,4	26,6	29,0
	3 (22. 1. 2025)	2,1	26,6	28,7
	4 (22. 1. 2025)	2,2	26,2	28,4
	<b>Průměr</b>	<b>2,4</b>	<b>26,3</b>	<b>28,7</b>
	<b>s</b>	<b>0,3</b>	<b>0,3</b>	<b>0,3</b>
F	1 (29. 1. 2025)	2,6	25,9	28,5
	2 (29. 1. 2025)	2,4	26,6	29,0
	3 (29. 1. 2025)	2,1	26,6	28,7
	4 (29. 1. 2025)	2,2	26,2	28,4
	<b>Průměr</b>	<b>2,3</b>	<b>26,3</b>	<b>28,6</b>
	<b>s</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,3</b>
G	1 (12. 2. 2025)	2,3	25,9	28,2
	2 (12. 2. 2025)	2,3	26,6	28,8
	3 (12. 2. 2025)	2,6	26,6	29,2
	4 (12. 2. 2025)	2,2	26,2	28,4
	<b>Průměr</b>	<b>2,3</b>	<b>26,3</b>	<b>28,6</b>
	<b>s</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>

Měření		$\gamma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]
H	1 (12. 3. 2025)	2,3	26,0	28,3
	2 (12. 3. 2025)	2,0	26,6	28,5
	3 (12. 3. 2025)	2,3	26,6	28,9
	4 (12. 3. 2025)	1,7	26,2	27,9
	<b>Průměr</b>	<b>2,1</b>	<b>26,3</b>	<b>28,4</b>
	<b>s</b>	<b>0,3</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>
I	1 (1. 4. 2025)	2,3	26,0	28,3
	2 (1. 4. 2025)	2,3	25,0	27,3
	3 (1. 4. 2025)	2,6	25,0	27,6
	4 (1. 4. 2025)	2,3	25,0	27,3
	<b>Průměr</b>	<b>2,3</b>	<b>25,3</b>	<b>27,6</b>
	<b>s</b>	<b>0,2</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>

**Příloha 7:** Volná povrchová energie ( $\gamma_s$ ) PE fólie po úpravě korunou skladovaná při 40 °C včetně její polární ( $\gamma_s^P$ ) a disperzní ( $\gamma_s^D$ ) složky a výběrových směrodatných odchylek (s). První série měření (15. 1. 2025 – 1. 4. 2025)

Měření		$\gamma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]
A	1 (15. 1. 2025)	13,5	26,4	39,9
	2 (15. 1. 2025)	12,3	27,0	39,3
	3 (15. 1. 2025)	11,0	27,1	38,1
	4 (15. 1. 2025)	12,0	26,7	38,6
	<b>Průměr</b>	<b>12,2</b>	<b>26,8</b>	<b>39,0</b>
	<b>s</b>	<b>1,0</b>	<b>0,3</b>	<b>0,8</b>
B	1 (15. 1. 2025)	10,6	28,3	38,9
	2 (15. 1. 2025)	9,7	28,3	37,9
	3 (15. 1. 2025)	9,8	27,5	37,2
	4 (15. 1. 2025)	9,3	28,0	37,3
	<b>Průměr</b>	<b>9,8</b>	<b>28,0</b>	<b>37,8</b>
	<b>s</b>	<b>0,5</b>	<b>0,4</b>	<b>0,8</b>
C	1 (15. 1. 2025)	7,7	28,2	35,8
	2 (15. 1. 2025)	8,9	27,7	36,5
	3 (15. 1. 2025)	7,7	27,6	35,3
	4 (15. 1. 2025)	7,7	27,7	35,5
	<b>Průměr</b>	<b>8,0</b>	<b>27,8</b>	<b>35,8</b>
	<b>s</b>	<b>0,6</b>	<b>0,3</b>	<b>0,5</b>
D	1 (16. 1. 2025)	3,0	28,6	31,5
	2 (16. 1. 2025)	3,0	28,7	31,7
	3 (16. 1. 2025)	2,2	29,9	32,1
	4 (16. 1. 2025)	2,2	30,1	32,3
	<b>Průměr</b>	<b>2,6</b>	<b>29,3</b>	<b>31,9</b>
	<b>s</b>	<b>0,5</b>	<b>0,8</b>	<b>0,4</b>
E	1 (22. 1. 2025)	2,8	26,7	29,5
	2 (22. 1. 2025)	3,2	26,8	30,0
	3 (22. 1. 2025)	2,4	27,1	29,5
	4 (22. 1. 2025)	2,2	28,6	30,7
	<b>Průměr</b>	<b>2,6</b>	<b>27,3</b>	<b>29,9</b>
	<b>s</b>	<b>0,5</b>	<b>0,9</b>	<b>0,6</b>
F	1 (29. 1. 2025)	2,3	25,9	28,2
	2 (29. 1. 2025)	2,4	26,0	28,4
	3 (29. 1. 2025)	2,1	26,6	28,7
	4 (29. 1. 2025)	2,2	26,2	28,4
	<b>Průměr</b>	<b>2,2</b>	<b>26,2</b>	<b>28,4</b>
	<b>s</b>	<b>0,1</b>	<b>0,3</b>	<b>0,2</b>
G	1 (12. 2. 2025)	2,8	25,9	28,8
	2 (12. 2. 2025)	2,4	26,6	29,0
	3 (12. 2. 2025)	2,1	26,6	28,7
	4 (12. 2. 2025)	2,2	26,2	28,4
	<b>Průměr</b>	<b>2,4</b>	<b>26,3</b>	<b>28,7</b>
	<b>s</b>	<b>0,3</b>	<b>0,3</b>	<b>0,3</b>

Měření		$\gamma_s^P$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s^D$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_s$ [mJ/m <sup>2</sup> ]
H	1 (12. 3. 2025)	2,6	25,0	27,6
	2 (12. 3. 2025)	1,7	26,0	27,7
	3 (12. 3. 2025)	2,3	26,6	28,9
	4 (12. 3. 2025)	2,2	26,0	28,2
	<b>Průměr</b>	<b>2,2</b>	<b>25,9</b>	<b>28,1</b>
	<b>s</b>	<b>0,4</b>	<b>0,7</b>	<b>0,6</b>
I	1 (1. 4. 2025)	2,6	25,0	27,6
	2 (1. 4. 2025)	2,3	26,0	28,3
	3 (1. 4. 2025)	2,0	25,1	27,1
	4 (1. 4. 2025)	2,3	26,0	28,3
	<b>Průměr</b>	<b>2,3</b>	<b>25,5</b>	<b>27,8</b>
	<b>s</b>	<b>0,2</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>