

Modifikace syntetických polymerů v nízkoteplotním plazmatu

Miroslav Palich

Bakalářská práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav fyziky a mater. inženýrství

akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Miroslav Palich**

Osobní číslo: **T11518**

Studijní program: **B2808 Chemie a technologie materiálů**

Studijní obor: **Materiálové inženýrství**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Modifikace syntetických polymerů v nízkoteplotním plazmatu**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte literární rešerši na dané téma. Informace čerpejte z doporučené literatury a článků v odborných časopisech. Veškeré literární zdroje správně citujte.
2. Charakterizujte povrchové vlastnosti výchozích polymerních substrátů pomocí měření statických a dynamických kontaktních úhlů smáčení.
3. Provedte modifikaci polymerních substrátů pomocí nízkoteplotního plazmatu a opět charakterizujte povrchové vlastnosti.
4. Diskutujte získané výsledky a pokuste se definovat vhodné procesní podmínky pro co nejefektivnější aktivaci povrchu polymeru.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. Mleziva J., Šňupárek J.: **Polymery – výroba, struktura, vlastnosti a použití. Sobotáles, 2000**
2. Hiemenz P.C.: **Principles of colloid and surface chemistry. Marcel Dekker, New York 1997**
3. Pashley R.M., Karaman M.E.: **Applied colloid and surface chemistry. John Wiley and Sons, 2004**
4. Bartovská L., Šišková M.: **Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav. Vydavatelství VŠCHT, Praha 2005**
5. Butt H.J., Kappl M.: **Surface and interfacial forces. Wiley-VCH. Weinheim 2010**
6. Roth J.R.: **Industrial plasma engineering: Principles. IOP, 2001**
7. Chan C.M.: **Polymer surface modification and characterization. Hanser/Gardner, New York 1994**

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Petr Smolka, Ph.D.

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

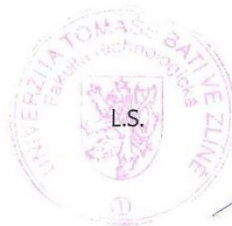
7. února 2014

Termín odevzdání bakalářské práce:

30. května 2014

Ve Zlíně dne 7. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




doc. Mgr. Aleš Mráček, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby¹⁾;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně

.....

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce popisuje povrchové vlastnosti syntetických polymerů a možnosti jejich modifikací pomocí nízkoteplotního plazmatu vzduchu a argonu. Experimentální část se zabývá vlivem volby pracovního plynu a doby expozice povrchu polymeru účinkům plazmatu na výslednou povrchovou energii. Povrchové vlastnosti byly charakterizovány pomocí měření statického kontaktního úhlu smáčení různých testovacích kapalin, který byl pomocí vybraných matematických modelů přepočítán na povrchovou energii.

Klíčová slova: Smáčivost, Povrchová energie, Kontaktní úhel, Nízkoteplotní plazma

ABSTRACT

This bachelor thesis describes surface properties of synthetic polymers and ways of modifying their surfaces with low-temperature plasma of air and argon. Experimental part deals with the effect of plasma gas choice and plasma treatment time on the resulting polymer surface free energy. The surface properties were characterised with the contact angle of various testing liquids. The contact angle was then converted into the surface free energy with the aid of selected mathematical models.

Keywords: Wetting, Surface free energy, Contact angle, Low-temperature plasma

Za odborné vedení, cenné připomínky a návrhy při vypracování této bakalářské práce bych chtěl poděkovat především svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Smolkovi, PhD. Dále bych rád poděkoval své rodině za podporu při studiu.

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

Ve Zlíně

.....

OBSAH

ÚVOD	10
TEORETICKÁ ČÁST	11
1 POLYMERY	12
1.1 OBECNÁ CHARAKTERISTIKA.....	12
1.2 CHEMICKÉ SLOŽENÍ.....	12
1.3 MEZIMOLEKULÁRNÍ INTERAKCE.....	13
1.3.1 Síly van der Waalsovy.....	13
1.3.2 Vodíkový můstek.....	14
1.4 ROZDĚLENÍ.....	15
1.5 ORIENTOVANÉ FÓLIE.....	16
1.6 UPLATNĚNÍ.....	17
2 POVRCHOVÉ VLASTNOSTI	18
2.1 FÁZOVÉ ROZHRAŇÍ.....	18
2.2 MOLEKULA VE FÁZOVÉM ROZHRAŇÍ.....	19
2.3 POVRCHOVÉ NAPĚTÍ KAPALIN.....	20
2.4 POVRCHOVÁ ENERGIE PEVNÝCH LÁTEK.....	21
2.5 KAPALINA NA POVRCHU PEVNÉ LÁTKY.....	22
2.6 MĚŘENÍ KONTAKTNÍHO ÚHLU SMÁČENÍ.....	24
2.6.1 Statické měření.....	24
2.6.2 Dynamické měření.....	25
3 PLAZMA	27
3.1 DEFINICE A PARAMETRY PLAZMATU.....	27
3.2 TYPY PLAZMATU.....	30
3.3 APLIKACE PLAZMATU.....	31
PRAKTICKÁ ČÁST	33
4 POUŽITÉ MATERIÁLY A PŘÍSTROJE	34
4.1 TESTOVANÉ MATERIÁLY.....	34
4.2 TESTOVACÍ KAPALINY.....	35
4.3 POUŽITÉ PŘÍSTROJE A PROGRAMY.....	35
5 VÝPOČTY POVRCHOVÝCH ENERGÍ	36
5.1 STAVOVÁ ROVNICE.....	36
5.2 TEORIE OWRK.....	36
5.3 TEORIE WU.....	37
5.4 TEORIE VAN OSS.....	37
6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ	38
7 DISKUZE VÝSLEDKŮ	51
ZÁVĚR	52
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	53
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	56
SEZNAM OBRÁZKŮ	58

SEZNAM TABULEK.....	59
SEZNAM GRAFŮ	60
SEZNAM PŘÍLOH.....	61

ÚVOD

Polymery jsou nedílnou součástí našeho každodenního života a jejich podíl v nejrůznějších (nejenom) průmyslových aplikacích stále roste. Překážkou většího rozšíření polymerů do konkrétních průmyslových oblastí je fakt, že některé polymery jsou velmi špatně smáčivé a mohou se velmi špatně potiskovat, lepit a jinak dále upravovat. Poměrně efektivní cestou ke zvýšení smáčivosti a tím zlepšení adhezních vlastností je modifikace pomocí nízkoteplotního plazmatu. Oproti chemickým postupům má výhodu v rychlosti úpravy a ekologické nezávadnosti. Tato práce se zabývá problematikou volby vhodného pracovního plynu a doby plazmatické modifikace u polymerních materiálů s různou polaritou.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERY

1.1 Obecná charakteristika

Na rozdíl od nízkomolekulárních látek jako je například voda, jejíž molekulová hmotnost je přibližně 18 g/mol, mají polymery molekulovou hmotnost v řádech tisíců až miliónů g/mol. Polymery jsou tedy makromolekulární látky, které vznikají spojováním stavební jednotky nazývané monomer do dlouhých řetězců. Jejich vlastnosti se však od monomerů značně liší. Tyto vlastnosti se přidáním nebo odebráním několika stavebních jednotek nezmění. Polymery mohou být jak syntetické tak přírodní. Při výrobě syntetických polymerů však vznikají polymery s řetězcí o různých délkách, které jsou statisticky rozložené kolem střední hodnoty. Obecně je tato směs označována jako neuniformní (polydisperzní). Zajímavé je také to, že polymery nemají bod varu, protože ten bývá mnohem vyšší, kvůli vysokým molekulovým hmotnostem a hustotě kohezní energie, než je teplota jejich rozkladu, proto nemohou polymery existovat v plynném skupenství [1].

1.2 Chemické složení

Mezi jednotlivými atomy převažují u polymerů vazby kovalentní. Tyto vazby jsou tvořeny elektrony z vnějších atomových obalů, kterým se říká valenční elektrony. Elektronový pár je pro oba atomy společný. Aby mohla vzniknout kovalentní vazba, musí výchozí látka splňovat určité podmínky a to takové, že musí být minimálně bifunkční (musí obsahovat funkční skupiny nebo násobné vazby). Výchozí látka, jejichž funkčnost je větší nebo rovna dvěma, můžeme nazývat monomery. Monomery jsou periodicky se opakující stavební jednotky. U homopolymerů jsou stavební jednotky totožné s jednotkami strukturními, ale u kopolymerů může být více stavebních jednotek jednotkou strukturní. Veliký vliv na vlastnosti polymerů má jejich chemické složení, kdy u lineárních polymerů dochází k částečné krystalizaci vlivem uspořádání řetězců (PE, PA) nebo u polymerů s objemným substituentem nebo nesymetričností monomeru nemůže ke krystalizaci dojít (PS, PMMA) [2],[3].

1.3 Mezimolekulární interakce

Důležitou roli hrají také interakce mezi dipóly a funkčními skupinami. Tyto interakce se nazývají sekundární vazby a jsou na rozdíl od vazeb primárních (kovalentní, kovová, iontová) nevysytitelné. Sekundární vazby působí nejen mezi molekulami stejné látky, ale i mezi molekulami nesterjními. Působí na sebe nejen molekuly H_2O v kapalně vodě a molekuly $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ v ethanolu, ale k interakci dochází i mezi molekulami H_2O a $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ve směsi vody a ethanolu [4].

Mezimolekulové síly lze rozdělit na dva druhy:

- van der Waalovy síly
- vodíkový můstek

1.3.1 Síly van der Waalovy

Při existenci těchto sil se musí předpokládat, že jsou oba útvary při přiblížení stálé, to znamená, že mají minimální snahu měnit své vazebné uspořádání. Při přiblížení takových útvarů jsou slabé van der Waalovy síly jediným typem interakce, které se projeví. Existují tři typy těchto sil [4],[5].

a) Coulombické síly

Tyto síly jsou v systémech, kde útvary mají permanentní elektrický dipól. Tedy u útvarů, jejichž kovalentní vazba je polární. Fyzikální podstata těchto sil je čistě elektrostatická. Tyto dipóly, které představují jednotlivé molekuly, se velmi silně ovlivňují, kdy stejně nabitě konce molekul se odpuzují a různě nabitě konce se přitahují. Tato asociaci dipólů se nazývá Keesonův efekt [4],[5].



Obr. 1: Ukázka orientace dipólů [4]

b) Indukční síly

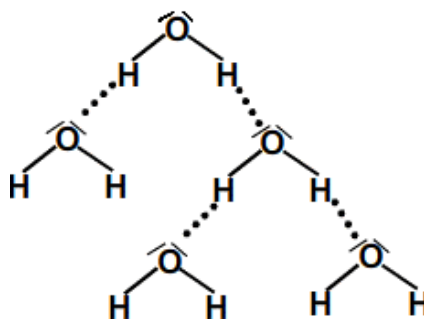
Působení molekuly s permanentním dipólem na jinou molekulu vede ke vzniku indukovaného dipólového momentu. Zesílené dipóly se k sobě elektrostaticky poutají. Těmto interakcím se říká Debeyův efekt. Rozlišujeme interakce dipól-dipólové, kde molekuly mají permanentní dipóly a dipól-molekulové, kde jedna z částic permanentní dipól nemá [4].

c) Disperzní síly

Coulombické a indukční síly jsou podmíněny účastí permanentního dipólu a proto se mohou objevit pouze u polárních molekul. U nepolárních molekul jsou přitažlivé síly jiného charakteru. Tyto síly vznikají pohybem záporných elektronů kolem kladného jádra. V každém okamžiku tedy existuje dipól (elektron-jádro), který rychle v čase mění směr. Tyto síly jsou označovány jako Londonovy síly [4].

1.3.2 Vodíkový můstek

Je to silná sekundární vazba, která se může označit jako přechod mezi vazbami primárními a sekundárními. Vodíkový můstek může vzniknout pouze v případě, že je vodík navázán kovalentní vazbou na silně elektronegativní prvek jako kyslík nebo dusík (funkci silně elektronegativního prvku zastává ještě atom fluoru, který však nemá smysl v polymerech uvažovat). Atom vodíku poté odhalí své kladné jádro a může si tak přitakovat elektronový pár jiného atomu, převážně kyslíku nebo dusíku. Vazba vodíkovým můstkem má zásadní vliv na fyzikální vlastnosti látek, protože výrazně zvětšuje mezimolekulové soudržné síly [4],[5].

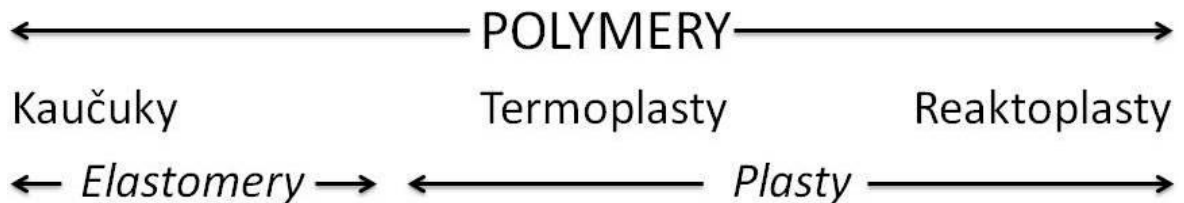


Obr. 2: Vodíkové můstky mezi

molekulami vody [5]

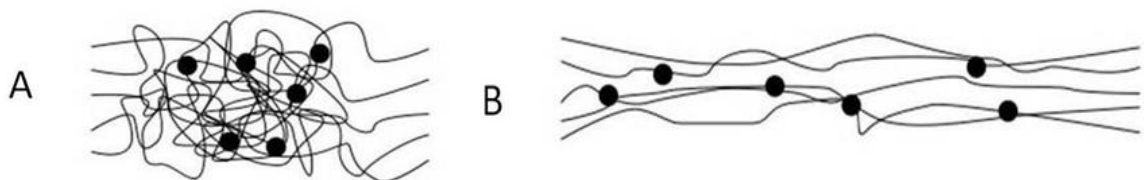
1.4 Rozdělení

Nejobecněji můžeme polymery rozdělit na elastomery a plasty, viz obrázek 3.:



Obr. 3: Rozdělení polymerů [6]

Elastomer je vysoce elastický polymer, který se dá prodloužit až o stovky procent a to převážně vratně. Existují pouze nad teplotou skelného přechodu (T_g), což umožňuje volný pohyb segmentů. Jsou zcela amorfní. Jejich pružnost je způsobena schopností zcela se překonfigurovat v závislosti na napětí, jak ukazuje obrázek 4:



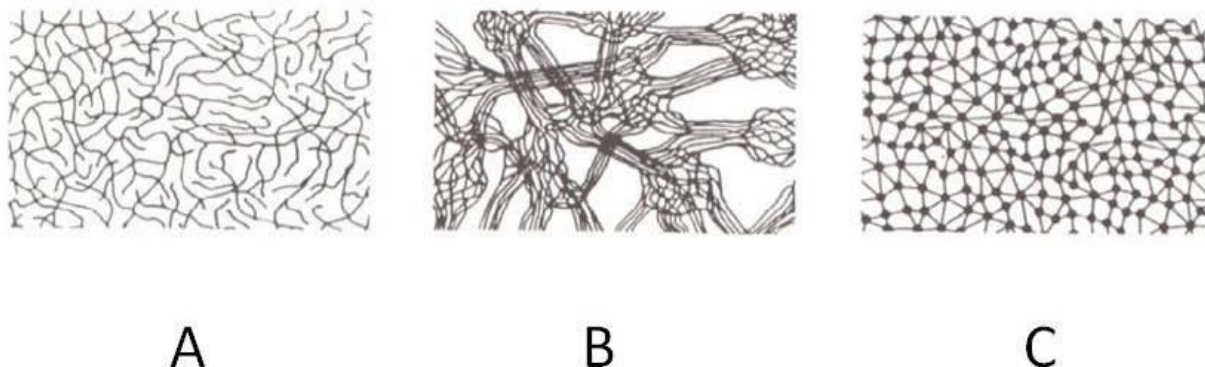
Obr. 4: Elastomer A – bez napětí, B - pod napětím [7]

Důležité je také to, aby elastomery měly velmi dlouhé řetězce, které umožní zapletení makromolekul, které zamezují viskóznímu toku a řídké síťování, které zabraňuje plastické deformaci při zatížení a umožní přechod k čistě vysoko elastické deformaci [8].

Plasty tedy můžeme dělit na:

a) termoplasty, které mohou být působením teploty roztaveny a před následným ochlazením mohou být tvarovány. Tyto změny se mohou provádět opakovaně. Termoplasty tvoří zpravidla lineární řetězce nebo řetězce málo rozvětvené. Mezi typické zástupce patří polyetylén a polyamidy.

b) reaktoplasty označované někdy jako termosety, jsou na rozdíl termoplastů opakovaně netavitelné z důvodu husté trojrozměrné sítě. Proces, kdy lineární molekuly přechází nevratnou chemickou reakcí do síťovaného stavu, se nazývá vytvrzování. K hlavním zástupcům reaktoplastů patří polyuretany a epoxidové pryskyřice[2].



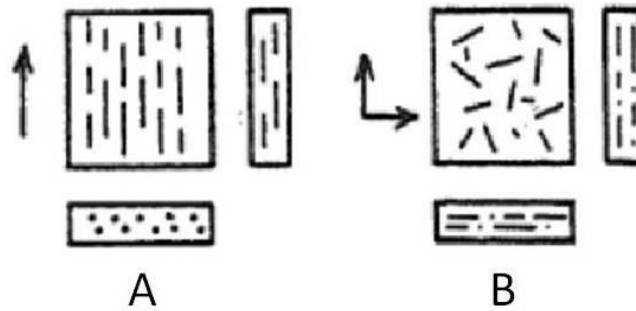
Obr. 5: Nadmolekulární struktura: A – amorfního termoplastu,
B – semikrystalického termoplastu, C - reaktoplastu [7]

1.5 Orientované fólie

Strukturní jednotky v polymerech jsou nahodile uspořádány. Toto uspořádání lze jednoduše měnit pomocí síly nad teplotami T_g jednotlivých polymerů. V kaučukovité oblasti se jednotlivé segmenty v makromolekulách orientují ve směru působící síly. Tato orientace je ovšem nad T_g vratná. To znamená, že pokud se odstraní působící síla, mizí i orientace makromolekul. Pokud ale orientovaný polymer ochladíme pod T_g , zůstane tvar nezměněn a orientace fixována po celou dobu pod T_g . Hlavním cílem orientace makromolekul je zlepšení mechanických vlastností. U jednosměrně orientovaných folií se v podélném směru vlastnosti výrazně zlepší, ale ve směru příčném se vlastnosti mohou zhoršit. Proto se dnes více využívají biaxiálně orientované folie, protože jejich vlastnosti jsou v obou směrech téměř stejné a přitom vyšší než ve foliích neorientovaných [9],[10].

Polymery pro výrobu orientovaných fólií

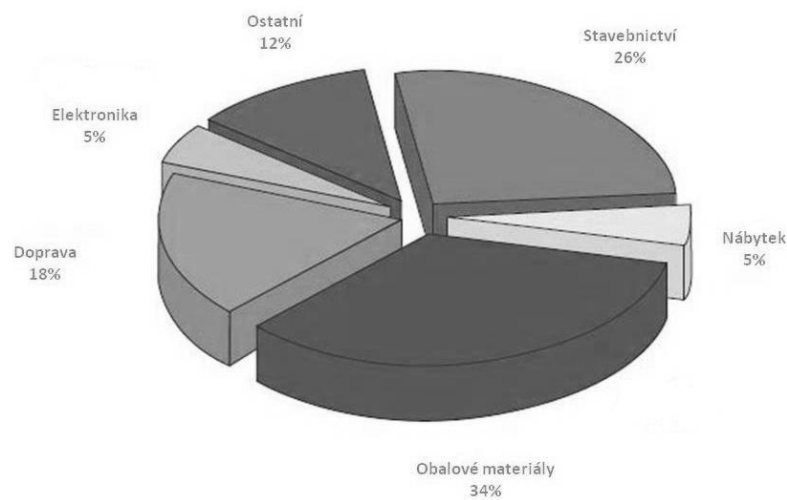
Pro výrobu orientovaných fólií se používá velmi mnoho polymerů. S každým typem polymeru se liší i jeho výroba. Mezi nejvíce vyráběné biaxiální fólie patří BOPET a BOPP [10].



Obr. 6: Orientace makromolekul v A) jednosměrně,
B) dvousměrně orientované fólii [9]

1.6 Uplatnění

Polymery se vyskytují ve všech odvětvích lidské činnosti a jsou nedílnou součástí každodenního života.



Obr. 7: Uplatnění plastů v roce 2012 [11]

2 POVRCHOVÉ VLASTNOSTI

2.1 Fázové rozhraní

Pojem fáze znamená určitou část zkoumaného systému, ve kterém se jeho vlastnosti nemění nebo se v prostoru mění spojitě. Jednotlivé fáze jsou od sebe odděleny fázovým rozhraním, kde se vlastnosti mění skokově. Z mikroskopického hlediska mají fázová rozhraní určitou tloušťku – minimálně jeden, většinou však několik molekulových průměrů a tedy i určitý objem [12].

Podle skupenského stavu fází, které se stýkají, bývají rozlišovány tyto fázová rozhraní:

- rozhraní kapalina/plyn
 - rozhraní kapalina/kapalina
- } mobilní rozhraní
- rozhraní pevná látka/ plyn
 - rozhraní pevná látka/ kapalina

 - rozhraní pevná látka/ pevná látka

Rozhraní plyn/plyn neexistuje, protože plyny se libovolně mísí.

Skupenství určuje základní charakteristiku stavu látky, která souvisí se stupněm uspořádanosti částic (molekul, atomů, iontů). Skupenství látky také úzce souvisí s kinetickou energií částic a energií jejich vzájemného působení [13].

Rozlišujeme skupenství:

- pevné
- kapalné
- plynné
- „plazma“

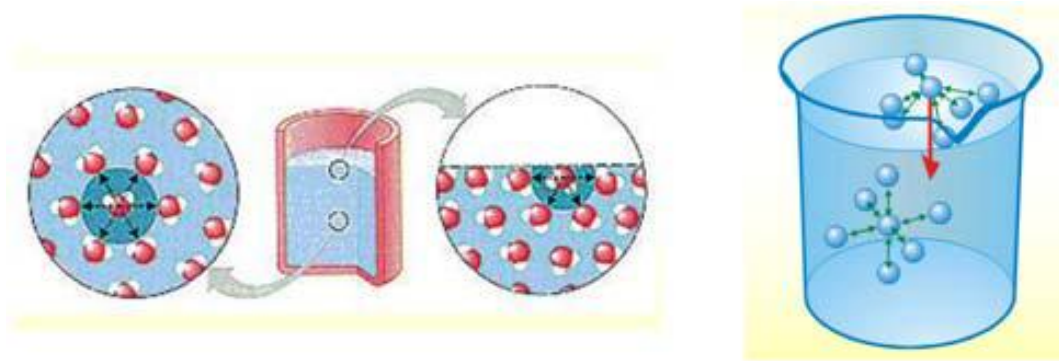
Pokud látka změní své skupenství, přijme nebo odevzdá okolí skupenské teplo.

Známe tyto změny skupenství:

- tání a tuhnutí
- vypařování, var a kondenzace
- sublimace a desublimace

2.2 Molekula ve fázovém rozhraní

V kapalinách jsou molekuly od se sebe vzdáleny jen velmi málo. V důsledku toho má každá molekula ve sféře molekulového působení další molekuly, které na ni působí přitažlivými silami. Na tom, kde se molekula vyskytuje, velmi záleží, protože mezi molekulami jsou rozdílné interakce na povrchu a v objemové fázi. Tento rozdíl je nejvíce patrný na rozhraní kapalina/čistá pára, kde u povrchu má molekula pouze část nejbližších sousedů, zatímco uvnitř kapaliny je obklopena ze všech stran, jak ukazuje obrázek 8.: [14], [15].



Obr. 8: Nerovnováha sil molekul v objemu a na povrchu [13]

Pokud budeme předpokládat, že mezi částicemi působí pouze Londonovy síly a že vzájemné působení všech částic je aditivní, může být energie molekuly v objemové fázi popsána tímto vztahem:

$$u^{objem} = - \int_r^{\infty} v \frac{C}{r^6} 4\pi r^2 = - \frac{4}{3} \frac{v\pi C}{r^3} \quad (1)$$

kde v je počet částic v jednotce objemu kapalně fáze, C je Londonova konstanta pro disperzní interakce mezi molekulami kapaliny a znaménko mínus znamená podle konvence přitažlivou energii.

U molekuly v rovině povrchu platí:

$$u^{povrch} = - \int_r^{\infty} v \frac{C}{r^6} 2\pi r^2 = - \frac{2}{3} \frac{v\pi C}{r^3} \quad (2)$$

Pokud rovnice (1) a (2) odečteme, zjistíme, že molekuly, které leží v povrchové vrstvě, mají vyšší energii než molekuly v objemové fázi. Pokud se budou přesouvat molekuly z objemu do povrchové vrstvy, vzroste jejich energie. Proto je k vytvoření nového povrchu důležité tuto energii dodat ve formě práce, která je úměrná počtu molekul převedených z objemové fáze do nově vzniklého rozhraní, a tedy nově vzniklé ploše rozhraní je popsána rovnicí (3) [12].

$$dW^{\text{rozhraní}} = \gamma \cdot dS \quad (3)$$

Konstanta γ je označována jako mezifázová (povrchová) energie. Její rozměr je energie/plocha [$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$] [12],[16].

2.3 Povrchové napětí kapalin

Pokud se popisují jevy na mobilních fázových rozhraních, používá se místo pojmu mezifázová energie pojem povrchové (mezifázové) napětí, které se definuje jako tečná síla, působící ve směru povrchu na jednotku délky. Její rozměr je tedy [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$]. U mobilních fázových rozhraní se mezifázová energie a povrchové napětí shodují jak rozměrově tak číselně. Povrchové napětí kapalin s rostoucí teplotou vždy klesá a při kritické teplotě je rovno nule. Vztah, který vyjadřuje závislost povrchového napětí na teplotě, se nazývá Eötvösova rovnice.

$$\gamma \left(\frac{M}{\rho_l} \right)^{2/3} = k(T_c - T) \quad (4)$$

kde M je molární hmotnost, ρ_l je hustota kapaliny, k je empirická konstanta (v soustavě SI má pro nepochopitelné sloučeniny hodnotu přibližně $2,12 \cdot 10^{-7}$) a T_c je kritická teplota. Povrchové napětí čistých kapalin se pohybují v širokém intervalu. Povrchové napětí zkapalněných plynů se pohybují okolo $0,2 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, zatímco povrchová napětí roztavených kovů nabývají hodnot v řádech stovek až tisíců $\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$. Pro odhad povrchového napětí organických látek se využívá veličiny zvané parachor, která není závislá na teplotě a je popsána rovnicí (5) [14],[15],[17].

$$[P] = \frac{M \cdot \gamma^{1/4}}{(\rho_l - \rho_g)} \quad (5)$$

kde $[P]$ je součet atomárních a strukturálních příspěvků, M je molární hmotnost, ρ_l je hustota kapaliny a ρ_g je hustota nasycené páry [12].

Atomární příspěvky	$\frac{[P] \cdot 10^7}{N^{1/4} m^{11/4} mol^{-1}}$	Strukturální příspěvky	$\frac{[P] \cdot 10^7}{N^{1/4} m^{11/4} mol^{-1}}$
vodík	30,4	dvojná vazba	41,3
kyslík	35,6	trojná vazba	82,9
fluor	45,7	dva atomy kyslíku v esteru nebo kyselině	106,7
chlor	96,6		
brom	120,9		
jod	161,8	tříčlenný kruh	29,7
síra	85,7	čtyřčlenný kruh	20,6
fosfor	67,0	pětičlenný kruh	15,1
dusík	22,2	šestičlenný kruh	10,8
arsen	89,1		
uhlík	8,5		
křemík	44,5		

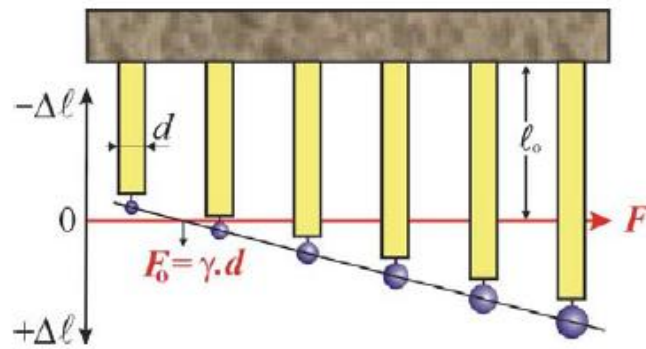
Obr. 9: Atomární a strukturální příspěvky parachoru [12]

2.4 Povrchová energie pevných látek

U pevných látek je situace s vysvětlením povrchové energie na rozdíl od kapalin velmi složitá. Povrchová energie a jiné fyzikální vlastnosti povrchu závisí také na předchozí historii (např.: čerstvě odštipnutý povrch krystalu bude mít jinou strukturu a energii než jaký měl před tím). Je to způsobeno i tím, že atomy v pevných látkách jsou za normálních teplot v relativně klidném stavu, pouze vibrují kolem svým rovnovážných poloh, a proto nemůžou zaujmout stav s minimální energií jako kapaliny.

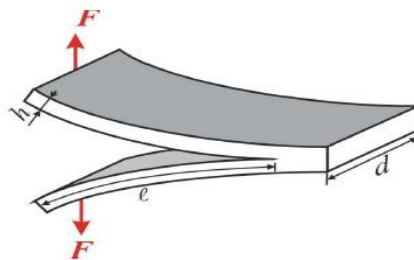
Možnosti přímého experimentálního stanovení povrchové energie jsou velmi omezené a různé metody se hodí pouze pro určité druhy materiálů. Mezi nejstarší metody patří metoda nulového tečení, která je založena na určení síly potřebné ke kompenzaci povrchových sil. Tato metoda je v hodná především pro plastické hmoty. Na tenké proužky s šířkou d se pověsí závaží různých hmotností. Po ustálení teploty pod teplotu tečení materiálu se změří změna délek vzorků (Δl). V závislosti hmotnosti závaží se vzorky prodlouží nebo se vlivem povrchových sil zkrátí. Průsečík Δl na F (osa souřadnic = nulové tečení) odpovídá rovnosti povrchových sil a tíže, platí rovnice (6) [12],[14],[15],[17].

$$F_0 = \gamma \cdot d \quad (6)$$



Obr. 10: Princip stanovení povrchového napětí
metodou nulového tečení [17]

U pevných látek s dobrou štěpitelností (slída) se měří síla, která je potřebná na to aby se trhlina, dříve vytvořená začala rozevírat. Tato síla závisí na délce trhliny, její šířce a tloušťce a povrchové energii [12].

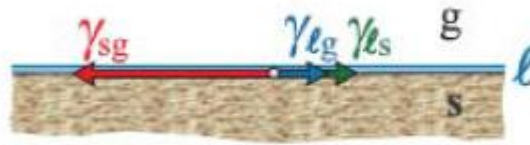


Obr. 11: Princip stanovení povrchové
energie metodou štěpení [12]

2.5 Kapalina na povrchu pevné látky

O tom jak se bude kapka kapaliny na povrchu pevné látky chovat, rozhodnou hodnoty mezifázových energií. Mohou nastat dva případy.

1) Pokud bude povrchová energie pevné látky větší než součet povrchové energie kapaliny a mezifázového napětí pevná látka-kapalina, $\gamma_{sg} > \gamma_{sl} + \gamma_{lg}$, kapalina se povrchu pevné látky rozetře to tenké vrstvy označované jako dokonalé smáčení (obr.: 12) [12],[18].



Obr. 12: Rozestírání [12]

2) Pokud nastane situace, že bude povrchová energie pevné látky menší než je součet povrchové energie kapaliny a mezifázové energie pevná látka-kapalina, $\gamma_{sg} < \gamma_{sl} + \gamma_{lg}$, k dokonalému smáčení nedojde a kapka zaujme na povrchu určitý tvar, charakterizovaný kontaktním úhlem smáčení θ , tedy úhlem, který svírá tečna povrchu kapky s rozhraním pevná látka-kapalina v bodě linie smáčení. Nastane rovnováha vyjádřená jako vektorový součet mezifázových napětí označována jako Youngova rovnice (7) [12],[18].

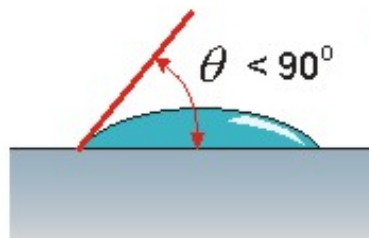
$$\gamma_{sg} = \gamma_{sl} + \gamma_{lg} \cos \theta \quad (7)$$

Pro kontaktní úhel smáčení plyne vztah 8.:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{sg} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lg}} \quad (8)$$

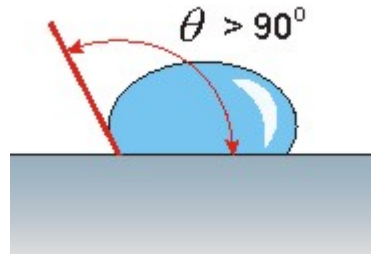
Podle velikosti kontaktního úhlu smáčení rozlišujeme kapaliny, které povrch:

1) Smáčejí, tyto kapky mají na povrchu ostrý kontaktní úhel smáčení, $0 < \theta < 90^\circ$ ($0 < \cos \theta < 1$), jak ukazuje (obr. 13) a platí že: $\gamma_{sg} > \gamma_{sl}$ [18].



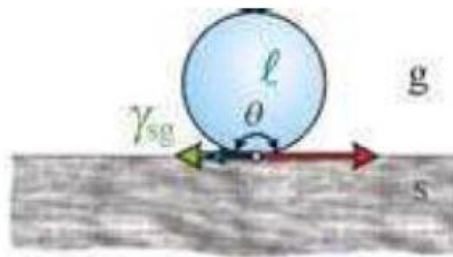
Obr. 13: Dobré smáčení [19]

2) Nesmáčejí, tyto kapky mají na povrchu tupý kontaktní úhel smáčení, $90^\circ < \theta < 180^\circ$ ($0 > \cos\theta > -1$), jak ukazuje (obr. 14) a platí že: $\gamma_{sg} < \gamma_{sl}$ [18].



Obr. 14: Špatné smáčení (nesmáčení) [19]

V mezním případě může nastat, že $\theta = 180^\circ$. Tato situace se označuje jako dokonalé nesmáčení (obr. 15) a zde platí: $\gamma_{sg} = \gamma_{sl} - \gamma_{lg}$ [18].



Obr. 15: Dokonalé nesmáčení [12]

2.6 Měření kontaktního úhlu smáčení

Kontaktní úhel smáčení je přímo měřitelnou vlastností fázového rozhraní pevná látka-kapalina-plyn a pro jeho měření byla vypracována řada metod. Mezi dva preferované typy měření patří [17]:

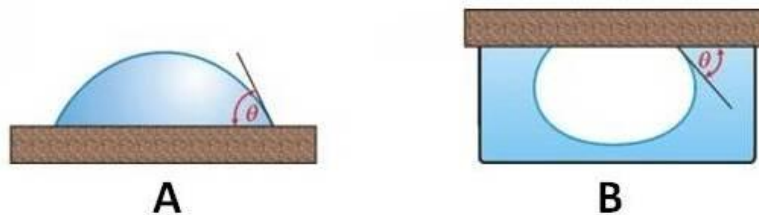
2.6.1 Statické měření

a) Měření kontaktního úhlu smáčení na naklánějící se destičce probíhá tak, že se vzorek ve tvaru destičky ponoří do kapaliny a naklání se tak dlouho, až je hladina kapaliny ve styku s destičkou vodorovná. Právě v tomto okamžiku svírá rovina destičky s rovinou hladiny kapaliny úhel θ [17].



Obr. 16: Měření úhlu smáčení na nakloněné destičce [17]

b) Měření úhlu smáčení na přisedlé kapce nebo přilínající bublině. Tato metoda je velmi častá pro svoji jednoduchost. Přisedlá kapka nebo bublina přilínající na tuhé látce ponořené v kapalině, je pozorována mikroskopem s goniometrickým okulárem, ze kterého se přímo odečítal úhel smáčení. V dnešní době se více využívá toho, že se kapka vyfotí fotoaparátém a počítačový software vyhodnotí úhel smáčení, čímž se celá metoda velmi zpřesní [14],[15].



Obr. 17: Měření úhlu smáčení na A) přisedlé kapce

B) přilínající bublině [17]

2.6.2 Dynamické měření

Vyvažování Wilhelmyho destičky. Tato metoda je založená na měření síly potřebné k vyvážení rovné svislé destičky ponořené do kapaliny. Síla je měřena velmi citlivými vahami. Pro destičku ponořenou do klidové úrovně hladiny (obr. 18) platí vztah mezi silou a úhlem smáčení [17]:

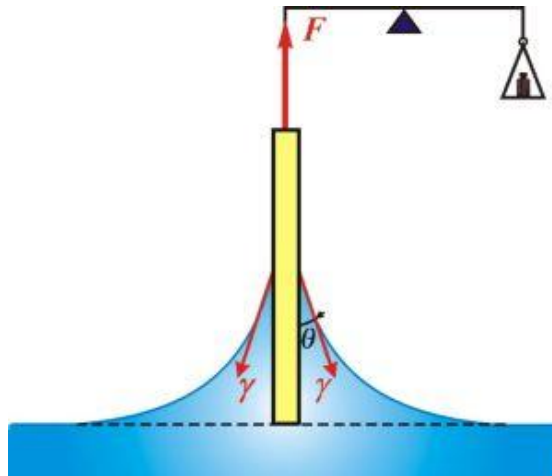
$$F = L \cdot \gamma \cdot \cos\theta \quad (9)$$

kde L je obvod destičky.

Pokud je ovšem destička ponořena do větší hloubky je třeba počítat i s vytlačeným objemem kapaliny destičkou V , Pak platí rovnice v tomto tvaru:

$$F = L \cdot \gamma \cdot \cos\theta - V \cdot \Delta\rho \cdot g \quad (10)$$

kde $\Delta\rho$ je rozdíl tekutin (kapaliny a plynné fáze) a g je tíhové zrychlení [17].



Obr. 18: Vyvažování Wilhelmyho destičky [17]

3 PLAZMA

3.1 Definice a parametry plazmatu

Plazma je velmi často označováno jako čtvrté skupenství hmoty. Pojmem označováno se myslí to, že plazma nevzniká skokově ale postupně. Ke změně skupenství dochází ohříváním látky na teplotu vyšší, než jsou vazebné energie jednotlivých stavů hmoty. Jako příklad uvedu vodu. Pod teplotou 0 °C existuje voda ve formě ledu, protože kinetická energie molekul není natolik silná, aby rozrušila krystalickou strukturu. Od teploty 0 °C do teploty 100 °C se voda nachází v kapalném stavu. V tomto stavu je kinetická energie velmi blízká energii vazebné. Nad 100 °C je kinetická energie daleko vyšší než energie vazebná. Pokud budeme plyn dále zahřívat, bude energie molekul tak vysoká, že dojde k jejich disociaci. Tento plyn už není vodní pára, protože obsahuje částice H₂ a O₂. Po dalším zahřátí tohoto plynu se konečně dostáváme ke čtvrtému skupenství. V tomto případě je dodaná energie tak vysoká, že dojde k odtrhávání elektronů z atomových obalů atomů. Tento ionizovaný plyn se nazývá plazma a obsahuje tedy jak záporné elektrony a kladné kationty, tak i neutrální částice. Složení plazmatu však netvoří pouze elektrony a kationty částic ale směs je velmi různorodá a obsahuje např. [20],[21]:

- elektrony
- kationty
- anionty (omezené množství)
- radikály
- neionizované atomy a molekuly
- excitované atomy a molekuly
- fotony různých vlnových délek

Jedna z definic plazmatu říká že: Plazma je kvazineutrální plyn vykazující kolektivní chování.

Kvazineutralita

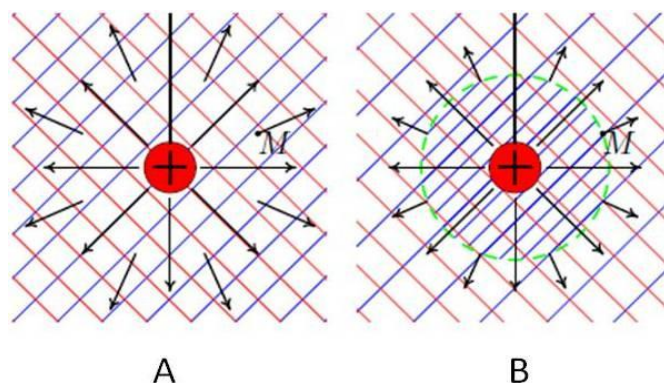
Tímto pojmem je myšleno, že plazma je sice složená z různých elektricky nabitých částic, které se mohou seskupovat a tvořit lokální náboje, avšak navenek působí jako by byla neutrální [22].

Kolektivní chování

Zatímco v plynu se částice ovlivňují, pouze pokud do sebe narazí, v plazmatu se částice ovlivňují i na dálku. Elektricky nabitě částice tvoří elektrické pole a v těchto polích na sebe silově působí částice až do vzdálenosti Debyeovy délky. Na delší vzdálenost je toto pole dostatečně odstíněno. Kladně a záporně nabitě částice se pohybují podle svého náboje – chovají se kolektivně [22].

Debyeova stínící délka

Představme si, že vložíme kladný náboj do plazmatu. Tento kladný náboj bude kolem sebe vytvářet elektrické pole o intenzitě M (obr. 19a). Protože jsou ale plazmatu přítomny záporně nabitě částice, budou přitahovány ke kladnému náboji. Jelikož ne každý elektron má stejnou energii, některé elektrony zůstanou zachyceny a některé pouze proletí. Kolem kladného náboje vznikne velmi rychle vrstva záporně nabitých elektronů a elektrické pole bude zeslabeno (obr. 19b) [21],[23].



Obr. 19: Elektrické pole A-ihned po vložení náboje

B-po odstínění [23]

Vzdálenost kde pole zeslábne na 37% své původní hodnoty, se nazývá Debyeova stínící délka a je dána vztahem (11) [23]:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 k_b T}{Ne^2}} \quad (11)$$

kde:

ε_0 je permitivita vakua k_b je Boltzmannova konstanta, T je termodynamická teplota, N je počet nabitých částic v 1 m^3 a e je náboj elektronu [21].

Plazmatický parametr

Někdy značený jako koncentrace plazmatu. Jedná se o počet částic v Debyeově sféře a je dán vztahem (12) [23].

$$N_D = n \frac{4}{3} \pi \lambda_D^3 \quad (12)$$

Plazmová frekvence

Pro vysvětlení tohoto pojmu představme plazma ve tvaru krychle složeného z kationtů (obr.: 22 - červeně) a elektronů (obr.: 22 - modře). Na levou stranu takového plazmatu přiložíme kladně nabitou desku. Záporně nabitě lehké elektrony budou k této desce přitahovány a velmi se začnou přemísťovat a naopak kladně nabitě velké kationty budou odpuzovány a sotva se pohnou. Po uzemnění desky elektrony už nic nepřitahuje k desce, ale jsou opět přitahovány zpátky kladným nábojem kationtů. Kvůli jejich malé hmotnosti získají velké zrychlení a mráček kladných kationtů přeletí. V tento okamžik jsou přitahovány zase na druhou stranu. Chovají jako by byly na pružině, protože jejich setrvačnost jim nedovolí zastavit v rovnovážné poloze. Tento kmitavý pohyb se nazývá plazmová oscilace. Úhlová frekvence takovýchto oscilací je potom plazmová frekvence a je popsána rovnicí 13 [22],[23].



Obr. 20: Plazmová oscilace [23]

$$\omega_p = \sqrt{\frac{N_D e^2}{\epsilon_0 m_e}} \quad (13)$$

kde N_D je plazmatický parametr, e je náboj elektronu, ϵ_0 je permitivita vakua a m_e je hmotnost elektronu [23].

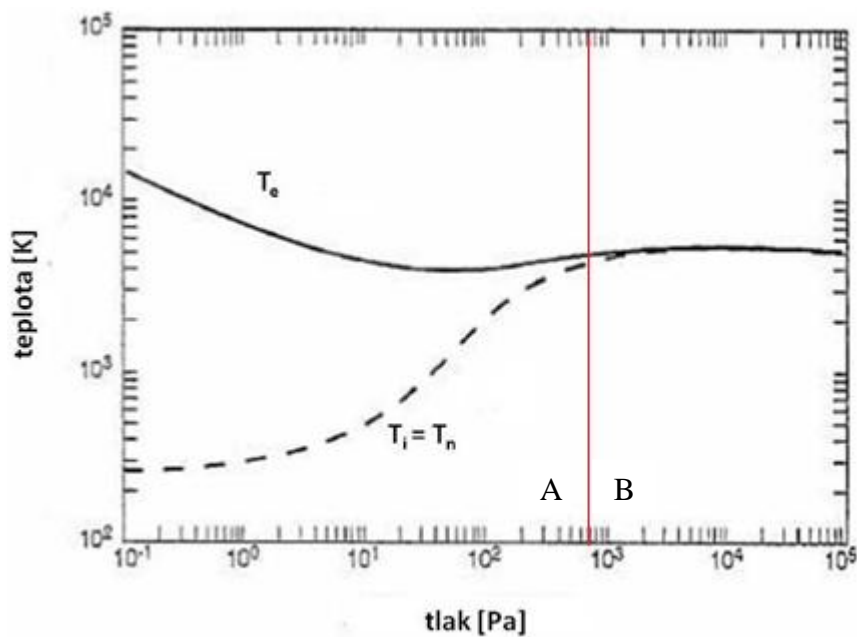
Kritéria pro plazma

Ionizovaný plyn musí splňovat tři kritéria, aby byl považován za plazma. Tyto tři podmínky jsou [20]:

- 1) Debyeova stínící délka musí být o mnoho menší než velikost systému, $\lambda_D \ll L$.
- 2) Počet částic v Debyeově sféře musí být mnohem větší než 1, $N_D \gg 1$.
- 3) Součin ω_p a τ musí být větší než 1, $\omega_p \tau > 1$, kde τ je střední doba mezi srážkami.

3.2 Typy plazmatu

Plazma můžeme dělit jako všechny látky podle různých parametrů. Nejdůležitějším parametrem je však teplota, především teplota neutrálních a ionizovaných částic.



Obr. 21: Rozdělení plazmatu podle teploty

A-nerovnovážné, B-rovnovážné [23]

Nízkoteplotní plazma

Toto plazma můžeme označovat jako nerovnovážné nebo neizotermní plazma. Teplota elektronů dosahuje teplot až 10^4 K, zatímco teplota kationtů a neutrálních iontů dosahuje teplot pouze okolo 300 K [24].

Vysokoteplotní plazma

Tento typ plazmatu je označován jako rovnovážné nebo izotermní plazma. V tomto typu plazmatu téměř neexistují žádné neutrální atomy nebo molekuly. Teplota dosahuje řádově 10^7 K a vyšší. Typ tohoto plazmatu se vyskytuje pouze ve hvězdách, kde se slučují atomy vodíků a vznikají atomy hélia. Část vzniklé energie je vyzářeno ve formě elektromagnetického vlnění. Vysokoteplotní plazma lze vytvořit pouze jaderným výbuchem nebo ve velmi složitých zařízeních (tokamak), které pracují pulzně. Životnost takového plazmatu je v řádech mikrosekund až milisekund [24].

3.3 Aplikace plazmatu

Úprava povrchových vlastností

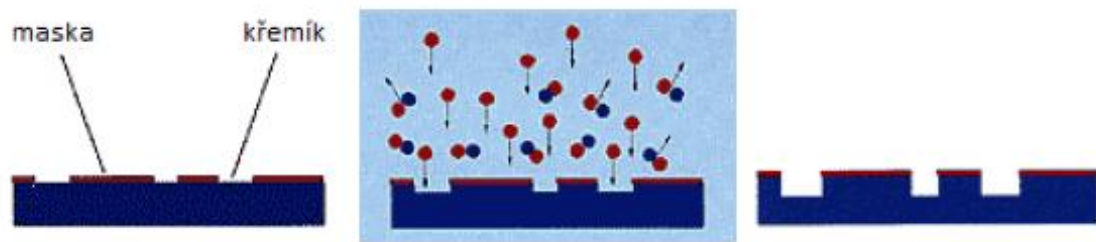
Velkou výhodou tohoto typu úpravy je to, že upravuje pouze povrch materiálu v minimální tloušťce a vlastnosti v objemové fázi zůstanou stejné. Změnu může vyvolat jak změna náboje, změna funkčních skupin i změna topografie povrchu. Tímto způsobem můžeme upravovat prášky, fólie ale i objemné tvary [25].

Podpurné plyny [25]:

1. Kyslík a Dusík – tyto plyny se používají především pro zlepšení smáčení
2. Fluorované plyny – nejčastěji oktafluorocyklobutan se používá pro zhoršení smáčení
3. Uhlovodíkové plyny – jako methan, ethan a acetylen jsou využívány pro antireflexní účely.
4. Vzácné plyny – nejčastěji helium a argon se používají na čištění povrchu nebo ke zlepšení adheze

Plazmové leptání

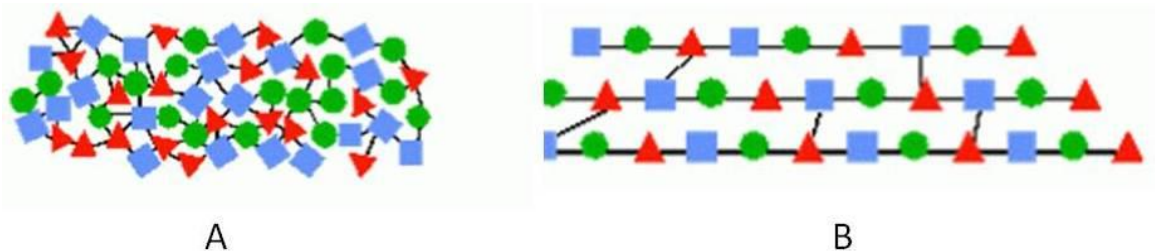
Tento typ úpravy se využívá nejčastěji v elektrotechnice a jako podpurné plyny se používají argon nebo dusík. Tyto plyny přenášejí dostatek energie schopné „naleptat“ povrch materiálu. Z tohoto důvodu se v průmyslu používá tzv.: maska, která je vyrobena z materiálu odolného plazmě. Jsou v ní vytvořeny otvory, kterými plazma projde a zbytek materiálu neporuší [26].



Obr. 22: Plazmové leptání s použitím masky [27]

Plazmová polymerace

Hlavním rozdílem plazmové polymerace od klasické je hlavně v tom, že nevzniká klasická struktura dlouhých řetězců, ale velmi hustá prostorová síť (obr.: 25). U plazmové polymerace není plazma částicí, které v propagačním kroku vytvářejí polymer, ale zdrojem energie reakce. U plazmové polymerace si energii dodanou plazmatem molekula monomeru rozdělí na fragmenty – radikály a poté dochází na povrchu povlakovaného předmětu k rekombinaci těchto radikálů a současně k prostorovému síťování. Tloušťka polymerní vrstvy může být od několika nm až po několik set μm . Výsledná vrstva má výbornou adhezi k podkladu a vysokou chemickou odolnost. Často zvyšuje i mechanické vlastnosti jako ohebnost, smáčivost a otěruvzdornost [28].



Obr. 23: A – plazmový polymer, B – klasický polymer [28]

Osvětlení

Jelikož jsou plazmové výboje doprovázeny vyzařováním světla, využívají se jako osvětlovací zařízení. Před vynalezením žárovky se používali jako zdroje osvětlení ulic výbojky s uhlíkovými elektrodami, mezi kterými byl plazmový výboj. V dnešní době se používá různých plynů k dosažení různých efektů jako například vysoká svítivost, jako zdroj záření v jiné než viditelné oblasti nebo k dosažení různých barevných efektů [29].

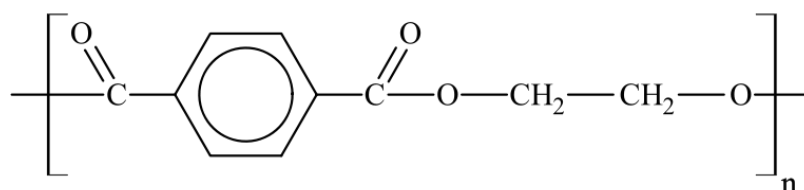
II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 POUŽITÉ MATERIÁLY A PŘÍSTROJE

4.1 Testované materiály

BOPET

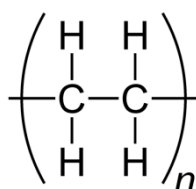
Biaxiálně orientovaný polyethyltereftalát patří do skupiny polyesterů a vyrábí se reakcí kyseliny tereftalové s etylenglykolem. Výrobu folií BOPET zahájila firma DuPont už v 1950. Je vyráběna tak, že se roztavený polymer vytlačuje na chladný válec, kde se zchladí do amorfního stavu. Biaxiální orientace pak nastává pomocí tahu, který je buď současný, nebo postupný. BOPET fólie mají výborné mechanické, ale i chemické vlastnosti a je možné je pokovovat [10].



Obr. 24: Strukturní vzorec polyethyltereftalátu [3]

LDPE

Nízko hustotní (low density) polyethylen se vyrábí radikálovou polymerací ethylenu za vysokého tlaku (vznik rozvětvených řetězců) nebo za nízkého tlaku (vznik lineárních řetězců). Výrobu zahájila firma ICI již v roce 1938. LDPE vykazuje vysokou odolnost vůči kyselinám a zásadám. Je použitelný do teploty 80 °C a používá se jako obalový materiál, především sáčky (mikroten) [3].



Obr. 25: Strukturní vzorec polyethylenu [3]

SCANBLEND

Jedná se o kopolymer polykarbonátu a akrylonitril-styren-akrylátu (PC/ASA). Akrylátový kaučuk není mísitelný s PC a je nutné použít kompatibilizátor. Vykazuje vysokou odolnost proti povětrnostním vlivům a odolnost proti UV záření. Je velmi snadno barvitelný. Používá se především v automobilovém průmyslu na výrobu mřížek a zrcátek v exteriéru nebo na palubní desky a panely v interiéru [30].

4.2 Testovací kapaliny

K testování velikosti povrchového napětí byly použity tři kapaliny (voda, ethylenglykol a glycerol). Obecně platí, že testovací kapalina nesmí s povrchem zkoumaného materiálu reagovat, jinak by byly naměřené výsledky nepoužitelné. Jejich povrchová napětí a jednotlivé komponenty nutné k dalším výpočtům jsou shrnuty v tabulce č. 1.

Tabulka 1: Použité kapaliny a jejich komponenty [31]

Kapalina	Povrchové napětí γ [mN.m ⁻¹]	Dispezní podíl γ^d [mN.m ⁻¹]	Polární podíl γ^p [mN.m ⁻¹]	Kyselá složka γ^+ [mN.m ⁻¹]	Zásaditá složka γ^- [mN.m ⁻¹]	Lifshitz-van der Waalsova složka γ^{LW} [mN.m ⁻¹]
Voda	72,8	22,8	50	25	25	22,8
Ethylenglykol	48	31,4	16,4	1,58	42,5	31,4
Glycerol	64	34,4	29,5	16,9	12,9	34,4

4.3 Použité přístroje a programy

- mikropipeta s příslušenstvím
- přenosný laboratorní goniometr
- software pro vyhodnocení kontaktního úhlu smáčení
- Wolfram Mathematica 9 – pro složitější výpočty povrchových energií
- plazmový reaktor – Diener Femto 13,56 MHz

5 VÝPOČTY POVRCHOVÝCH ENERGIÍ

K získání povrchových energií a jejich komponent byly využity následující teorie.

5.1 Stavová rovnice

Tato rovnice byla zapsána Berthelotem a poskytuje rychlé a poměrně přesné výsledky. Výhodou této metody je to, že z rovnice dostaneme přímo hodnotu povrchové energie materiálu.

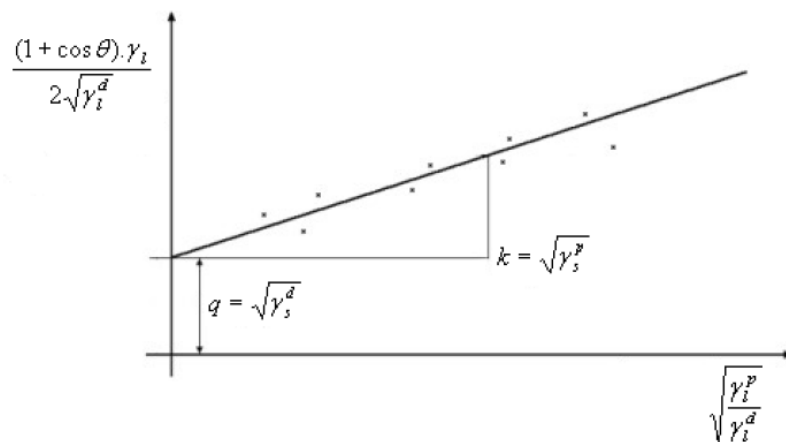
$$\gamma_{sg} = \left(\frac{\cos\theta + 1}{2} \right)^2 \cdot \gamma_{lg} \quad (14)$$

5.2 Teorie OWRK

Tato metoda nese název podle počátečních jmen autorů (Owens-Wendt-Rabel-Kaelble). Pro určení povrchové energie materiálu stačí dvě kapaliny, u kterých známe jejich komponenty. Využívá se rovnice (15), která je lineární. Vynesením do grafu získáme polární a disperzní složky zkoumaného materiálu. Celková energie je pak dána jejich součtem jak ukazuje rovnice (16) [32].

$$\frac{(1 + \cos\theta) \cdot \gamma_l}{2\sqrt{\gamma_l^d}} = \sqrt{\gamma_s^p} \cdot \sqrt{\frac{\gamma_l^p}{\gamma_l^d}} + \sqrt{\gamma_s^d} \quad (15)$$

$$\gamma_s = \gamma_s^d + \gamma_s^p \quad (16)$$



Obr. 26: Určení komponent povrchové energie
pevné látky podle teorie OWRK [32]

5.3 Teorie Wu

Pro tuto teorii platí také rovnice (16), tedy že součet polární a disperzní složky je celková povrchová energie. K určení jsou potřeba také dvě kapaliny. Wu sestavil rovnici (17) podle které bylo počítáno [32].

$$(1 + \cos\theta)\gamma_l = 4 \left(\frac{\gamma_l^d \cdot \gamma_s^d}{\gamma_l^d + \gamma_s^d} + \frac{\gamma_l^p \cdot \gamma_s^p}{\gamma_l^p + \gamma_s^p} \right) \quad (17)$$

5.4 Teorie van Oss

Nazývaná také jako acido-bazická teorie, která rozšiřuje předchozí teorie o to, že polární složka je rozdělena na část kyselou (γ^+) a zásaditou (γ^-) a část disperzní je označena jako složka nepolární (γ^{LW}). Pro výpočet všech komponent van Ossovi teorie je nutné použít tři kapaliny a k výpočtu se používá rovnice (18) a pro výpočet celkové povrchové energie se použije rovnice (19) [33].

$$(1 + \cos\theta) \cdot \gamma_l = 2 \left(\sqrt{\gamma_s^{LW} \cdot \gamma_l^{LW}} + \sqrt{\gamma_s^+ \cdot \gamma_l^-} + \sqrt{\gamma_s^- \cdot \gamma_l^+} \right) \quad (18)$$

$$\gamma_s = \gamma_s^{LW} + 2 \cdot \sqrt{\gamma_s^+ \cdot \gamma_s^-} \quad (19)$$

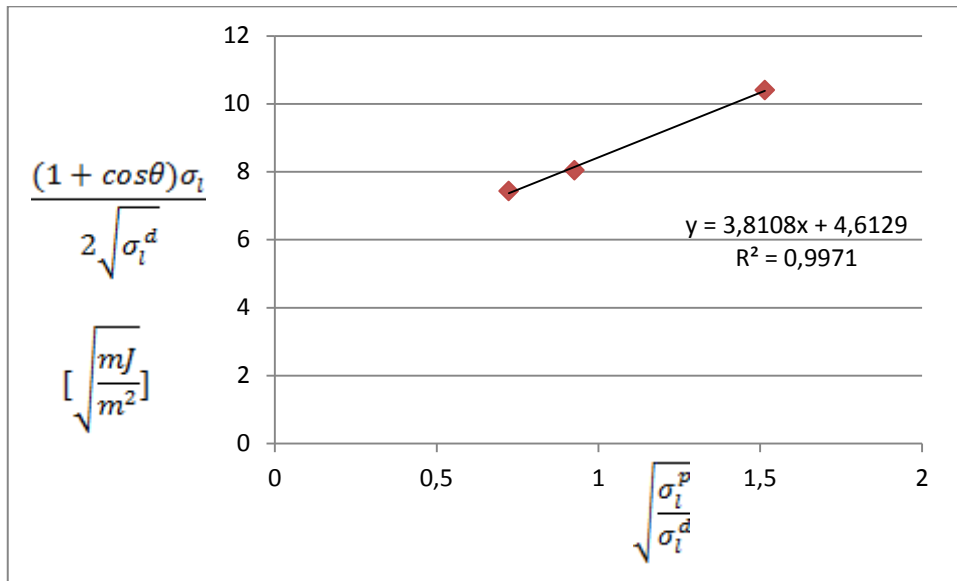
6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Kontaktní úhel smáčení byl měřen jak na neplazmovaných tak plazmovaných vzorcích. Vzorky byly plazmovány v reaktoru Diener Femto 13,56 MHz o výkonu 100 W. K plazmování byly použity dva podpůrné plyny (vzduch a argon) o průtoku 10 sccm a v různých časech (5, 30, 60 s). Kontaktní úhel byl měřen okamžitě po vyjmutí vzorku z reaktoru. Ke zjištění kontaktních úhlů smáčení byly nejprve naneseny kapky mikropipetou o objemu 3 μl na povrch materiálu. Tvar kapky na povrchu vzorku byl vyfocen a následně vyhodnocen softwarem. Všechny hodnoty naměřených kontaktních úhlů smáčení jsou uvedeny v příloze P I. Příloze P II jsou přiloženy všechny grafy podle metody OWRK, jeden graf je pro názornost vložen do výsledků (graf 1). Teorie podle van Osse a podle Wu byly spočítány pomocí programu Wolfram Mathematica. V následujících tabulkách jsou uvedeny průměrné hodnoty kontaktního úhlu včetně jejich chyby měření, dále jsou uvedeny jednotlivé hodnoty povrchových energií podle teorií uvedených v kapitole 5. Pro lepší přehlednost jsou jednotlivé hodnoty povrchových energií rozlišeny barevně, vždy každé teorii náleží jedna barva. Uvedeny jsou také polární a disperzní složky.

Tabulka 2: Naměřené a vypočítané hodnoty pro BOPET – neplazmovaný

BOPET										
	H ₂ O	EG	G	Wu teorie	H ₂ O + G		G + EG		H ₂ O + EG	
kontaktní úhel [°]	70,4	42,5	61,6		γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p
odchylka	0,3	0,2	0,4		17,8	19,7	20,8	16,6	19,3	18,9
energie [mJ.m ⁻²]	32,4	36,1	34,8	energie [mJ.m ⁻²]	37,5		37,4		38,2	
OWRK teorie	γ_s^d	γ_s^p	van Oss teorie	γ_s^{LW}		γ_s^+		γ_s^-		
	23,1	8,6		16,8	4,5	14,3				
energie [mJ.m ⁻²]	35,8			energie [mJ.m ⁻²]	32,8					

Graf 1: Stanovení disperzní a polární složky podle teorie OWRK



Tabulka 3: Naměřené a vypočítané hodnoty pro BOPET – plazma - vzduch 5 s

BOPET	Plazma – vzduch 5 s									
	H ₂ O	EG	G	Wu teorie	H ₂ O + G		G + EG		H ₂ O + EG	
kontaktní úhel [°]	30,7	0	30,8		γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p
odchylka	0,5	0	0,5		18,7	43,8	20,1	40,4	19,5	42,9
energie [mJ.m ⁻²]	62,9	48	55,3	energie [mJ.m ⁻²]	62,5		60,5		62,4	
OWRK teorie	γ_s^d	γ_s^p	van Oss teorie	γ_s^{LW}	γ_s^+	γ_s^-				
	10,2	55,9		7,6	12,4	55,4				
energie [mJ.m ⁻²]	66,1			energie [mJ.m ⁻²]	60,1					

Tabulka 4: Naměřené a vypočítané hodnoty pro BOPET – plazma - vzduch 30 s

BOPET	Plazma – vzduch 30 s									
	H ₂ O	EG	G	Wu teorie	H ₂ O + G		G + EG		H ₂ O + EG	
kontaktní úhel [°]	34,4	0	36,6		γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p
odchylka	0,4	0	0,3		15,6	46,6	22,6	31,2	19,7	42,1
energie [mJ.m ⁻²]	60,6	48	51,9	energie [mJ.m ⁻²]	62,2		53,8		61,8	
OWRK teorie	γ_s^d	γ_s^p		van Oss teorie	γ_s^{LW}		γ_s^+		γ_s^-	
	10,6	52,2			6,1		14,7		15,6	
energie [mJ.m ⁻²]	62,8			energie [mJ.m ⁻²]	60,9					

Tabulka 5: Naměřené a vypočítané hodnoty pro BOPET – plazma - vzduch 60 s

BOPET	Plazma – vzduch 60 s									
	H ₂ O	EG	G	Wu teorie	H ₂ O + G		G + EG		H ₂ O + EG	
kontaktní úhel [°]	31,3	0	26,2		γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p
odchylka	0,5	0	0,5		21,4	40,9	18,6	47,8	19,6	42,5
energie [mJ.m ⁻²]	62,6	48	57,6	energie [mJ.m ⁻²]	62,9		66,4		61,1	
OWRK teorie	γ_s^d	γ_s^p		van Oss teorie	γ_s^{LW}		γ_s^+		γ_s^-	
	11,5	53,9			11		9,4		53,9	
energie [mJ.m ⁻²]	65,3			energie [mJ.m ⁻²]	55,9					

Tabulka 6: Naměřené a vypočítané hodnoty pro BOPET – plazma - argon 5 s

BOPET	Plazma – argon 5 s									
	H ₂ O	EG	G	Wu teorie	H ₂ O + G		G + EG		H ₂ O + EG	
kontaktní úhel [°]	20,7	0	21,9		γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p
odchylka	0,4	0	0,3		18,9	50,4	17,6	54,7	15,6	54,8
energie [mJ.m ⁻²]	68,2	48	59,5	energie [mJ.m ⁻²]	69,3		72,3		70,4	
OWRK teorie	γ_s^d	γ_s^p		van Oss teorie	γ_s^{LW}		γ_s^+		γ_s^-	
	7,9	66,2			7,3		11,8		66,1	
energie [mJ.m ⁻²]	74,1			energie [mJ.m ⁻²]	63,2					

Tabulka 7: Naměřené a vypočítané hodnoty pro BOPET – plazma - argon 30 s

BOPET	Plazma – argon 30 s									
	H ₂ O	EG	G	Wu teorie	H ₂ O + G		G + EG		H ₂ O + EG	
kontaktní úhel [°]	31,9	0	25,5		γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p
odchylka	0,3	0	0,3		20,9	42,6	18,4	48,9	19,3	44
energie [mJ.m ⁻²]	62,2	48	57,9	energie [mJ.m ⁻²]	63,5		67,3		63,3	
OWRK teorie	γ_s^d	γ_s^p		van Oss teorie	γ_s^{LW}		γ_s^+		γ_s^-	
	12	52,8			12,1		8,7		52,9	
energie [mJ.m ⁻²]	64,8			energie [mJ.m ⁻²]	54,9					

Tabulka 8: Naměřené a vypočítané hodnoty pro BOPET – plazma - argon 60 s

BOPET	Plazma – argon 60 s									
	H ₂ O	EG	G	Wu teorie	H ₂ O + G		G + EG		H ₂ O + EG	
kontaktní úhel [°]	21,2	0	20,9		γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p
odchylka	0,3	0	0,3		19,4	49,6	17,4	56,2	18,1	51,1
energie [mJ.m ⁻²]	67,9	48	59,8	energie [mJ.m ⁻²]	69		73,6		69,2	
OWRK teorie	γ_s^d	γ_s^p		van Oss teorie	γ_s^{LW}		γ_s^+		γ_s^-	
	8,2	65,4			7,9	11,2		65,4		
energie [mJ.m ⁻²]	73,6			energie [mJ.m ⁻²]	62,1					

Tabulka 9: Naměřené a vypočítané hodnoty pro LDPE – neplazmovaný

LDPE										
	H ₂ O	EG	G	Wu teorie	H ₂ O + G		G + EG		H ₂ O + EG	
kontaktní úhel [°]	91,4	80,4	93,8		γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p
odchylka	0,4	0,4	0,3		2,5	22,1	12,7	7	7,2	15,9
energie [mJ.m ⁻²]	17,3	16,3	13,3	energie [mJ.m ⁻²]	24,6		19,7		23,1	
OWRK teorie	γ_s^d	γ_s^p		van Oss teorie	γ_s^{LW}		γ_s^+		γ_s^-	
	4,8	12,4			1,1	7,5		11,6		
energie [mJ.m ⁻²]	17,2			energie [mJ.m ⁻²]	19,7					

Tabulka 10: Naměřené a vypočítané hodnoty pro LDPE – plazma - vzduch 5 s

LDPE	Plazma – vzduch 5 s									
	H ₂ O	EG	G	Wu teorie	H ₂ O + G		G + EG		H ₂ O + EG	
kontaktní úhel [°]	83,9	58,9	74,4		γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p
odchylka	0,6	0,5	0,4		16,4	13,2	16,5	13,2	16,5	13,2
energie [mJ.m ⁻²]	22,3	27,6	25,7	energie [mJ.m ⁻²]	29,6		29,7		19,7	
OWRK teorie	γ_s^d	γ_s^p		van Oss teorie	γ_s^{LW}		γ_s^+		γ_s^-	
	20	7,4			16,5		2,4		7,3	
energie [mJ.m ⁻²]	27,4			energie [mJ.m ⁻²]	24,9					

Tabulka 11: Naměřené a vypočítané hodnoty pro LDPE – plazma - vzduch 30 s

LDPE	Plazma – vzduch 30 s									
	H ₂ O	EG	G	Wu teorie	H ₂ O + G		G + EG		H ₂ O + EG	
kontaktní úhel [°]	61,4	44,1	62,3		γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p
odchylka	0,5	0,3	0,4		9,9	33,7	19,9	17,1	15	28,1
energie [mJ.m ⁻²]	39,8	35,4	34,3	energie [mJ.m ⁻²]	43,6		37		43,1	
OWRK teorie	γ_s^d	γ_s^p		van Oss teorie	γ_s^{LW}		γ_s^+		γ_s^-	
	10,4	29,6			4,6		11,8		9,9	
energie [mJ.m ⁻²]	40			energie [mJ.m ⁻²]	41,3					

Tabulka 12: Naměřené a vypočítané hodnoty pro LDPE – plazma - vzduch 60 s

LDPE	Plazma – vzduch 60 s									
	H ₂ O	EG	G	Wu teorie	H ₂ O + G		G + EG		H ₂ O + EG	
kontaktní úhel [°]	58,6	27,1	49,2		γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p
odchylka	0,4	0,5	0,6		20,5	25,2	22,2	23	21,4	24,6
energie [mJ.m ⁻²]	42,1	42,8	43,7	energie [mJ.m ⁻²]	45,7		45,5		46	
OWRK teorie	γ_s^d	γ_s^p		van Oss teorie	γ_s^{LW}		γ_s^+		γ_s^-	
	21,4	22,8			17,8		5,7		22,6	
energie [mJ.m ⁻²]	44,2			energie [mJ.m ⁻²]	40,5					

Tabulka 13: Naměřené a vypočítané hodnoty pro LDPE – plazma - argon 5 s

LDPE	Plazma – argon 5 s									
	H ₂ O	EG	G	Wu teorie	H ₂ O + G		G + EG		H ₂ O + EG	
kontaktní úhel [°]	69,5	53,1	69,2		γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p
odchylka	0,5	0,4	0,6		8,9	28,7	17,5	15,2	13,4	24,2
energie [mJ.m ⁻²]	33,1	30,8	29,3	energie [mJ.m ⁻²]	37,6		32,7		37,6	
OWRK teorie	γ_s^d	γ_s^p		van Oss teorie	γ_s^{LW}		γ_s^+		γ_s^-	
	10,3	22,9			4,9		9,4		22,1	
energie [mJ.m ⁻²]	33,2			energie [mJ.m ⁻²]	33,7					

Tabulka 14: Naměřené a vypočítané hodnoty pro LDPE – plazma - argon 30 s

LDPE	Plazma – argon 30 s									
	H ₂ O	EG	G	Wu teorie	H ₂ O + G		G + EG		H ₂ O + EG	
kontaktní úhel [°]	50,8	24,5	51,9		γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p
odchylka	0,6	0,3	0,3		12,4	38,7	27,1	16,7	19,4	31,8
energie [mJ.m ⁻²]	48,5	43,8	41,8	energie [mJ.m ⁻²]	51,1		43,8		51,2	
OWRK teorie	γ_s^d		γ_s^p	van Oss teorie	γ_s^{LW}		γ_s^+	γ_s^-		
	13,3		35,2		5,6		14,8	33,9		
energie [mJ.m ⁻²]	48,6			energie [mJ.m ⁻²]	50,4					

Tabulka 15: Naměřené a vypočítané hodnoty pro LDPE – plazma - argon 60 s

LDPE	Plazma – argon 60 s									
	H ₂ O	EG	G	Wu teorie	H ₂ O + G		G + EG		H ₂ O + EG	
kontaktní úhel [°]	63,1	33,4	42,3		γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p
odchylka	0,4	0,6	0,3		31,1	18,7	14,8	42,6	20,1	23,5
energie [mJ.m ⁻²]	38,5	40,4	48,4	energie [mJ.m ⁻²]	49,8		57,4		43,6	
OWRK teorie	γ_s^d		γ_s^p	van Oss teorie	γ_s^{LW}		γ_s^+	γ_s^-		
	27,3		16,9		37,6		0,4	17,8		
energie [mJ.m ⁻²]	44,2			energie [mJ.m ⁻²]	43,1					

Tabulka 16: Naměřené a vypočítané hodnoty pro SCANBLEND – neplazmovaný

SCANBLEND										
	H ₂ O	EG	G	Wu teorie	H ₂ O + G		G + EG		H ₂ O + EG	
kontaktní úhel [°]	79,6	53,3	66,7		γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p
odchylka	0,6	0,4	0,4		21,6	13,1	14,7	20,2	17,6	14,9
energie [mJ.m ⁻²]	25,4	30,6	31,1	energie [mJ.m ⁻²]	34,6		34,9		32,5	
OWRK teorie	γ_s^d	γ_s^p		van Oss teorie	γ_s^{LW}		γ_s^+		γ_s^-	
	23,1	8,6			23,6	1,2		8,7		
energie [mJ.m ⁻²]	31,6			energie [mJ.m ⁻²]	30,2					

Tabulka 17: Naměřené a vypočítané hodnoty pro SCANBLEND – plazma - vzduch 5 s

SCANBLEND	Plazma – vzduch 5 s									
	H ₂ O	EG	G	Wu teorie	H ₂ O + G		G + EG		H ₂ O + EG	
kontaktní úhel [°]	36,5	16,1	41,2		γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p
odchylka	0,4	0,2	0,5		14,5	44,9	22,2	28,6	18,9	40,1
energie [mJ.m ⁻²]	59,2	46,1	49,1	energie [mJ.m ⁻²]	59,4		50,8		59	
OWRK teorie	γ_s^d	γ_s^p		van Oss teorie	γ_s^{LW}		γ_s^+		γ_s^-	
	9,1	52,8			4,2	16,4		51,5		
energie [mJ.m ⁻²]	61,9			energie [mJ.m ⁻²]	62,3					

Tabulka 18: Naměřené a vypočítané hodnoty pro SCANBLEND – plazma - vzduch 30 s

SCANBLEND	Plazma – vzduch 30 s									
	H ₂ O	EG	G	Wu teorie	H ₂ O + G		G + EG		H ₂ O + EG	
kontaktní úhel [°]	60,4	35,6	54,9		γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p
odchylka	0,5	0,5	0,4		15,6	28,4	20,6	21,1	18,3	25,3
energie [mJ.m ⁻²]	40,6	39,4	39,7	energie [mJ.m ⁻²]	44		41,7		43,6	
OWRK teorie	γ_s^d		γ_s^p	van Oss teorie	γ_s^{LW}		γ_s^+		γ_s^-	
	24,7		16,8		12,1		7,3		24,4	
energie [mJ.m ⁻²]	41,5			energie [mJ.m ⁻²]	38,7					

Tabulka 19: Naměřené a vypočítané hodnoty pro SCANBLEND – plazma - vzduch 60 s

SCANBLEND	Plazma – vzduch 60 s									
	H ₂ O	EG	G	Wu teorie	H ₂ O + G		G + EG		H ₂ O + EG	
kontaktní úhel [°]	38,9	0	27,7		γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p
odchylka	0,6	0	0,4		24,3	34,5	19	45,4	20,9	36,9
energie [mJ.m ⁻²]	57,5	48	56,9	energie [mJ.m ⁻²]	58,8		64,4		57,8	
OWRK teorie	γ_s^d		γ_s^p	van Oss teorie	γ_s^{LW}		γ_s^+		γ_s^-	
	16		42,8		17,1		6,3		43,1	
energie [mJ.m ⁻²]	58,8			energie [mJ.m ⁻²]	50,1					

Tabulka 20: Naměřené a vypočítané hodnoty pro SCANBLEND – plazma - argon 5 s

SCANBLEND	Plazma – argon 5 s									
	H ₂ O	EG	G	Wu teorie	H ₂ O + G		G + EG		H ₂ O + EG	
kontaktní úhel [°]	39,7	13,6	27,4		γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p
odchylka	0,5	0,5	0,3		23,6	35,8	17,4	50,5	19,5	39
energie [mJ.m ⁻²]	56,9	46,7	56,9	energie [mJ.m ⁻²]	59,4		67,9		58,5	
OWRK teorie	γ_s^d	γ_s^p		van Oss teorie	γ_s^{LW}		γ_s^+		γ_s^-	
	16,3	43,2			17,9	5,3		43,7		
energie [mJ.m ⁻²]	58,5			energie [mJ.m ⁻²]	48,5					

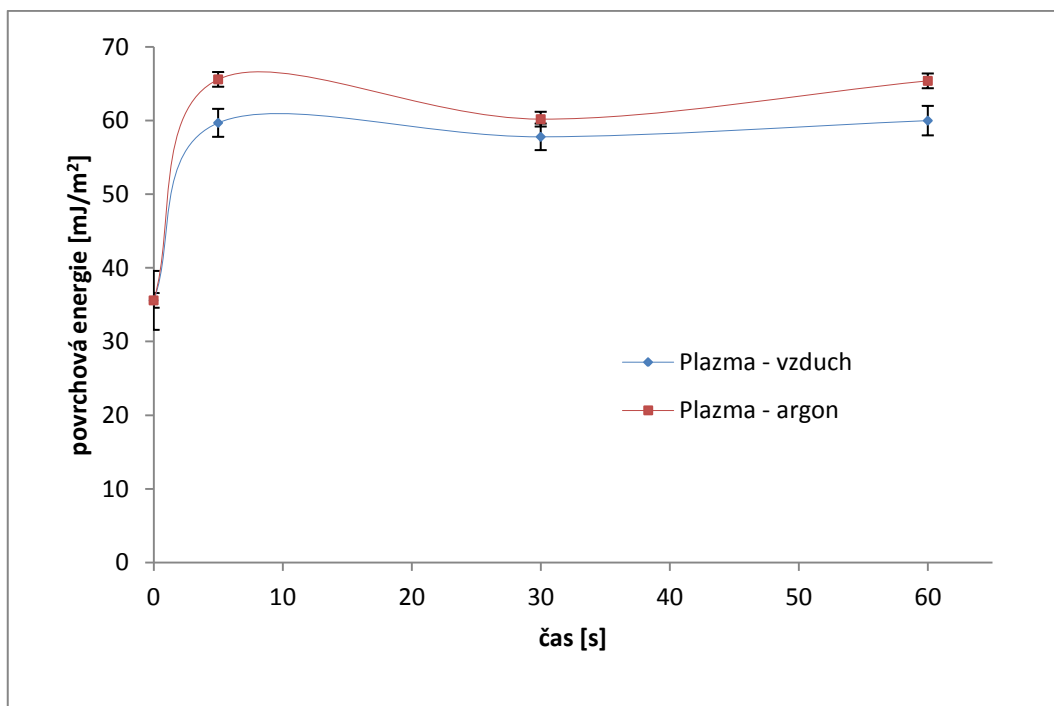
Tabulka 21: Naměřené a vypočítané hodnoty pro SCANBLEND – plazma - argon 30 s

SCANBLEND	Plazma – argon 30 s									
	H ₂ O	EG	G	Wu teorie	H ₂ O + G		G + EG		H ₂ O + EG	
kontaktní úhel [°]	42,8	20,6	49,7		γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p
odchylka	0,3	0,3	0,3		10,5	47,8	27,3	17,8	18,7	37,7
energie [mJ.m ⁻²]	54,7	44,9	43,4	energie [mJ.m ⁻²]	58,3		45,1		56,4	
OWRK teorie	γ_s^d	γ_s^p		van Oss teorie	γ_s^{LW}		γ_s^+		γ_s^-	
	9,3	46,8			2,3	20,2		44,9		
energie [mJ.m ⁻²]	56,1			energie [mJ.m ⁻²]	62,5					

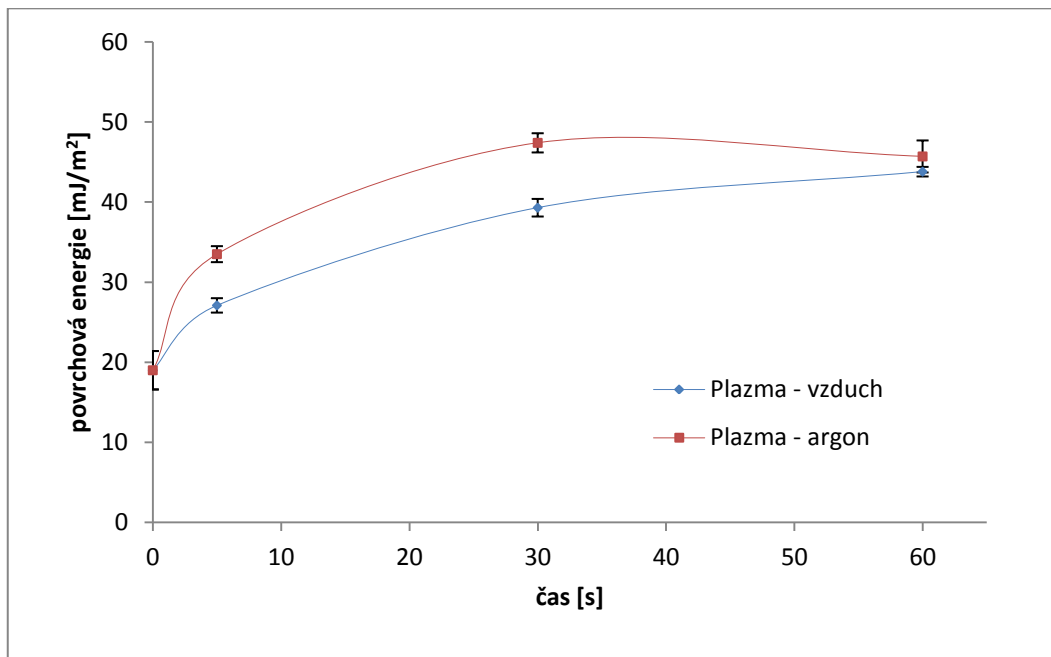
Tabulka 22: Naměřené a vypočítané hodnoty pro SCANBLEND – plazma - argon 60 s

SCANBLEND	Plazma – argon 60 s									
	H ₂ O	EG	G		H ₂ O + G		G + EG		H ₂ O + EG	
kontaktní úhel [°]	38,1	10,9	32,1	Wu teorie	γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p	γ_s^d	γ_s^p
odchylka	0,5	0,4	0,5		19,9	39,7	19,4	40,8	19,6	39,9
energie [mJ.m ⁻²]	58,1	47,2	54,6	energie [mJ.m ⁻²]	59,6		60,2		59,5	
OWRK teorie	γ_s^d		γ_s^p	van Oss teorie	γ_s^{LW}		γ_s^+		γ_s^-	
	13,4		46,3		12,2		8,7		46,2	
energie [mJ.m ⁻²]	59,7			energie [mJ.m ⁻²]	52,3					

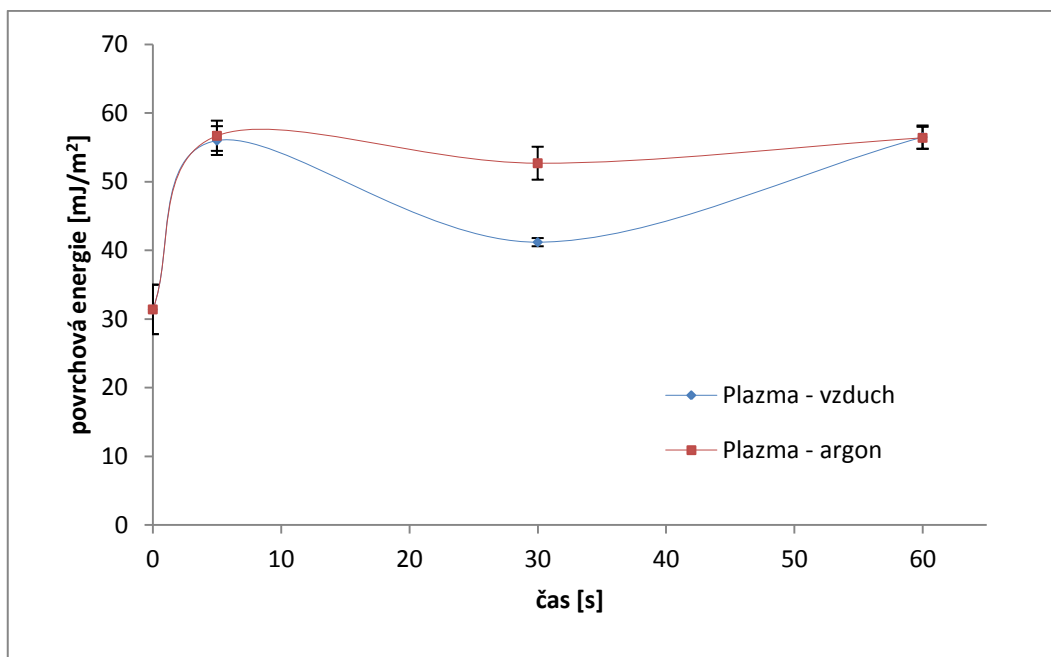
Graf 2: Závislost průměrné povrchové energie na délce expozice pro BOPET



Graf 3: Závislost průměrné povrchové energie na délce expozice pro LDPE



Graf 4: Závislost průměrné povrchové energie na délce expozice pro SCANBLEND



7 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Kontaktní úhel smáčení byl měřen metodou sedící kapky. Mezi tři použité kapaliny patřily voda, ethylenglykol a glycerol. Z takto staticky zjištěných hodnot kontaktních úhlů byly stanoveny hodnoty povrchových energií podle různých metod, které byly porovnány mezi sebou. Jako nejpřesnější se zdá být metoda OWRK, která poskytovala poměrně přesné výsledky (podle koeficientu determinace, který nebyl menší než 0,95), které jsou součástí přílohy P II. Metoda Wu vykazovala velký rozptyl hodnot a některé výsledky se lišily zásadním rozdílem hlavně pro kombinaci kapalin ethylenglykol - glycerol. U výsledků pomocí stavové rovnice se nejvíce blížily hodnoty spočítané pro vodu. Teorie podle van Osse se v některých případech také velmi přiblížila a naopak v některých případech se výrazně lišila. U některých vzorků, převážně plazmovaných, se vyskytl problém s ethylenglykolem, protože jeho povrchová energie byla příliš nízká a docházelo k rozestírání. Obecně lze říct, že u polárních vzorků (BOPET a SCANBLEND) stačí použít vodu jako měřicí kapalinu a u nepolárního vzorku (LDPE) je nejlepší metoda OWRK, tedy kombinace všech tří kapalin. Dále byla sledována změna povrchové energie v závislosti na době expozice. U vzorků BOPET a SCANBLEND se povrchová energie téměř neměnila s různou délkou expozice, což může být z důvodu částečného odleptávání už naplazmovaných vrstev na rozdíl od vzorku LDPE, kde se povrchová energie postupně zvyšovala u obou použitých pracovních plynů. Zajímavým zjištěním je fakt, že pro efektivní aktivaci povrchu u studovaných polárních plastů je dostačující doba plazmatické úpravy 5 sekund, zatímco u nepolárního plastu (LDPE) má smysl použít delší expoziční doby.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo v teoretické části přiblížit problematiku fázového rozhraní pevná látka/plyn a základní teoretické poznatky o plazmatu. V praktické části bylo hlavním cílem stanovit povrchovou energii vybraných polymerních vzorků a modifikovat vzorky pomocí nízkoteplotního plazmatu. Jako pracovní plyn byl zvolen vzduch a argon. Byla také sledována změna povrchové energie v závislosti na délce expozice vzorku v plazmatu. Obecně lze říct, že vzduch i argon mají na modifikovaný povrch materiálu podobný vliv. U všech vzorků byla sledována změna kontaktního úhlu smáčení, který byl měřen metodou sedící kapky. Z průměrných hodnot kontaktních úhlů byly počítány povrchové energie vybraných materiálů pomocí různých metod. Mezi nejvhodnější metodu patří teorie OWRK, která poskytovala poměrně přesné výsledky, za cenu nutnosti měřit na jednom povrchu kontaktní úhel alespoň tří různých kapalin. Lze říct, že pro rutinní stanovení povrchové energie u velké sady vzorků by bylo možné použít postup, kdy je provedeno vyhodnocení pomocí metody OWRK, dále je stanovena povrchová energie metodou stavové rovnice pro každou kapalinu zvlášť a pro další měření je pak používána pouze kapalina, u níž se výsledek nejvíce blíží tomu z metody OWRK. Bez kontrolního měření pomocí OWRK však nelze použití samotné stavové rovnice doporučit.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PROKOPOVÁ I.: *Makromolekulární chemie*. 2 vydání. VŠCHT 2007, Praha.
ISBN 978-80-7080-662-3
- [2] STOKLASA K.: *Makromolekulární chemie 1*. Studijní materiály.
Fakulta technologická, UTB Zlín.
- [3] MLEZIVA J., ŠŇUPÁREK J.: *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*.
Sobotáles 2000. ISBN 80-85920-72-7
- [4] KLIKORKA J., HÁJEK B., VOTINSKÝ J.: *Obecná a anorganická chemie*.
2 vydání, SNTL, Praha 1989
- [5] HOBZA P., ZAHRADNÍK R.: *Mezimolekulové komplexy*. Academia, Praha 1988
- [6] KRATOCHVÍL B., ŠVORČÍK V., VOJTĚCH D.: *Úvod do studia materiálů*.
1 vydání. Praha 2005. ISBN 80-7080-568-4
- [7] DUCHÁČEK V.: *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vydání.
Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-617-6
- [8] STOKLASA K.: *Makromolekulární chemie 2-Polymerní materiály*.
studijní materiály. Fakulta technologická, UTB Zlín.
- [9] MEISSNER B., ZILVAR V.: *Fyzika polymerů*. Praha: SNTL 1987
- [10] DEMUSE M.: *Biaxial stretching of film*.
Woodhead Publishing 2011. ISBN 978-7-84569-675-7
- [11] [online]. [cit. 2014-2-15]. Dostupný z www:
<http://198.103.48.1333/industrial/technical-info/benchmarking/plastics/generic-processes.cfm?attr=4>
- [12] BARTOVSKÁ L., ŠIŠKOVÁ M.: *Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav*.
Vydavatelství VŠCHT 2005, Praha. ISBN 80-7080-579-X.
- [13] Artemis: *Učební texty - Fázové přechody*. Pff OU, Katedra fyziky.
[online]. [cit. 2014-1-30]. Dostupný z www:
http://artemis.osu.cz:8080/artemis/uploaded/199_2%20Fazove%20prechody.pdf
- [14] PASHLEY R.M., KARAMAN M.E., *Principles of colloid and surface chemistry*.
John Wiley and Sons, 2004, ISBN 0-470-86883-X

- [15] BUTT H.J., KAPP M.: *Surface and interfacial forces*. Wiley-VCH. Weinheim 2010, ISBN 978-3-52740849-8
- [16] VIKOVÁ M.: *Učební texty – prezentace pdf*. Katedra textilních materiálů. TU Liberec [online].[cit. 2014-2-25]. Dostupné z WWW: <http://www.ft.tul.cz/depart/ktc/include/osobni_stranky/vikova.martina/teaching/9smac1.pdf>
- [17] BARTOVSKÁ L., ŠIŠKOVÁ M.: *Co je co v povrchové a koloidní chemii – výkladový slovník*. VŠCHT Praha [online]. [cit. 2014-3-3]. Dostupné z www: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-001/
- [18] NOVÁK J. a kol.: *Fyzikální chemie – bakalářský a magisterský kurz*. 1. vydání, VŠCHT Praha, 2008. ISBN 978-80-7080-675-3
- [19] <http://www.vscht.cz/fch/prikladnik/prikladnik/p.12.1.html>
- [20] *Učební texty - Plazmochemie*. FT UTB, [online]. [cit. 2014-3-14]. Dostupný z www: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/plazmochemie/PCH_02.pdf
- [21] CHEN F.F.: *Úvod do fyziky plazmatu*. Přel. K. Rohlena. 3. Vydání, ČSAV v Praze 1984. Přel. z: *Introduction to Plasma Physics*.
- [22] KREJČÍ V.: *Plazma, čtvrté skupenství hmoty*. I. Vydání, Orbis, Praha 1974.
- [23] http://fyzweb.cz/materialy/hvizdy/5_plazma.pdf [online]. [cit. 2014-3-15].
- [24] LIBRA M., KLUIBER Z.: *Plazma je všude kolem nás*. [on-line]. 2009, [cit. 2014-03-28]. Dostupné z www: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=22863
- [25] CHAN C.M.: *Polymer surface modification and characterization*. Hanser/Gardnee. Munich 1993. ISBN 3-446-15870-7
- [26] DIENER ELECTRONICS. *Glossary of terms: Etching Mask* [online]. [cit. 2014-03-31]. Dostupné z WWW: <http://www.plasma.de/en/glossary/glossary-entry-435.html>
- [27] DIENER ELECTRONICS [online]. *Plazmová technika* [cit. 2014-03-31]. Dostupné z WWW: <http://www.plasma.de/cz/plasmatechnique/etching.html>
- [28] CHEMPOINT. *Plazmová polymerace* [online]. [cit. 2014-04-01]. Dostupné z WWW: <http://www.chempoint.cz/plazmova-polymerizace>

- [29] ROTH J.R.: *Industrial plasma engineering: Principles*. IOP 2001
ISBN 0-7503-0318-2
- [30] ULTRACKI L. *Polymer blends handbook*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
2002. ISBN:14020111132
- [31] KREVELEN D.W., NIJENHUIS K.: *Properties of Polymers - Their Correlation
with Chemical Structure; their Numerical Estimation and Prediction from Additive
Group Contributions*. 4th ed., Elsevier, Oxford 2009. ISBN: 978-0-08-054819-7
- [32] Krüss: *www stránky firmy* [online]. [cit. 2014-5-12]. Dostupný z WWW:
<http://www.kruss.de/en/theory/measurements/contact-angle/models/owrk.html>
- [33] KWOK, D.Y.: The usefulness of the Lifshitz–van der Waals:acid–base approach for
surface tension components and interfacial tensions. *Colloids and surfaces A :
Physicochemical and Engineering Aspects*. 1999.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

BOPET	Biaxiálně orientovaný polyethyltereftalát
C	Londonova konstanta pro disperzní interakce
e	Náboj elektronu ($1,602 \cdot 10^{-19}$ [C])
EG	Ethylenglykol
F	Síla [N]
G	Glycerol
g	Tíhové zrychlení ($9,81$ [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$])
H ₂ O	Voda
k	Empirická konstanta [$2,12 \cdot 10^{-7}$]
k _B	Boltzmanova konstanta ($1,38 \cdot 10^{-23}$ [$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$])
L	Délka [m]
M	Molární hmotnost [$\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$]
m _e	Hmotnost elektronu ($9,109 \cdot 10^{-31}$ [kg])
N	Počet částic
N _D	Plazmatický parametr
P	Parachor
PA	Polyamid
PE	Polyethylen
PMMA	Polymethylmethakrylát
PS	Polystyren
r	Poloměr [m]
S	Plocha [m^2]
T	Teplota [K]
T _c	Kritická teplota [K]

T_e	Teplota elektronů [K]
T_g	Teplota skelného přechodu [K]
T_i	Teplota iontů [K]
T_n	Teplota neutrálních částic [K]
u	Energie [J]
V	Objem [m^3]
W	Práce [W]
γ	Povrchové napětí [$mN.m^{-1}$]
γ^-	Zásaditá složka povrchové energie [$mN.m^{-1}$]
γ^+	Kyselá složka povrchové energie [$mN.m^{-1}$]
γ^d	Disperzní složka povrchové energie [$mN.m^{-1}$]
γ_{lg}	Povrchové napětí na rozhraní kapalně a plynné fáze [$mN.m^{-1}$]
γ^{LW}	Lifshits-van der Waalsova složka povrchové energie [$mN.m^{-1}$]
γ^p	Polární složka povrchové energie [$mN.m^{-1}$]
γ_{sg}	Povrchové napětí na rozhraní pevné a plynné fáze [$mN.m^{-1}$]
γ_{sl}	Povrchové napětí na rozhraní pevné a kapalně fáze [$mN.m^{-1}$]
θ	Kontaktní úhel smáčení [$^\circ$]
λ_D	Debyeova stínící délka [m]
ν	Počet částic v objemu kapalně fáze
π	Ludolfovo číslo (3,1416)
ρ_g	Hustota plynně fáze [$kg.m^{-3}$]
ρ_l	Hustota kapalně fáze [$kg.m^{-3}$]
ϵ_0	Permitivita vakua ($8,8.10^{-12}$ [$F.m^{-1}$])
ω_p	Plazmatická frekvence [Hz]

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Ukázka orientace dipólů</i>	13
<i>Obr. 2: Vodíkové můstky mezi molekulami vody</i>	14
<i>Obr. 3: Rozdělení polymerů</i>	15
<i>Obr. 4: Elastomer A – bez napětí, B - pod napětím</i>	15
<i>Obr. 5: Nadmolekulární struktura: A – amorfního termoplastu, B – semikrystalického termoplastu, C - reaktoplastu</i>	16
<i>Obr. 6: Orientace makromolekul v A) jednosměrně, B) dvousměrně orientované fólii</i>	17
<i>Obr. 7: Uplatnění plastů v roce 2012</i>	17
<i>Obr. 8: Nerovnováha sil molekul v objemu a na povrchu</i>	19
<i>Obr. 9: Atomární a strukturní příspěvky parachoru</i>	21
<i>Obr. 10: Princip stanovení povrchového napětí metodou nulového tečení</i>	22
<i>Obr. 11: Princip stanovení povrchové energie metodou štěpení</i>	22
<i>Obr. 12: Rozestírání</i>	23
<i>Obr. 13: Dobré smáčení</i>	23
<i>Obr. 14: Špatné smáčení (nesmáčení)</i>	24
<i>Obr. 15: Dokonalé nesmáčení</i>	24
<i>Obr. 16: Měření úhlu smáčení na nakloněné destičce</i>	25
<i>Obr. 17: Měření úhlu smáčení na A) přisedlé kapce, B) přilnavící bublině</i>	25
<i>Obr. 18: Vyvažování Wilhelmyho destičky</i>	26
<i>Obr. 19: Elektrické pole A-ihned po vložení náboje, B-po odstínění</i>	28
<i>Obr. 20: Plazmová oscilace</i>	29
<i>Obr. 21: Rozdělení plazmatu podle teploty A-nerovnovážné, B-rovnovážné</i>	30
<i>Obr. 22: Plazmové leptání s použitím masky</i>	32
<i>Obr. 23: A – plazmový polymer, B – klasický polymer</i>	32
<i>Obr. 24: Strukturní vzorec polyethyltereftalátu</i>	34
<i>Obr. 25: Strukturní vzorec polyethylenu</i>	34
<i>Obr. 26: Určení komponent povrchové energie pevné látky podle teorie OWRK</i>	36

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: <i>Použité kapaliny a jejich komponenty</i>	35
Tabulka 2: <i>Naměřené a vypočítané hodnoty pro BOPET – neplazmovaný</i>	38
Tabulka 3: <i>Naměřené a vypočítané hodnoty pro BOPET – plazma - vzduch 5 s</i>	39
Tabulka 4: <i>Naměřené a vypočítané hodnoty pro BOPET – plazma - vzduch 30 s</i>	40
Tabulka 5: <i>Naměřené a vypočítané hodnoty pro BOPET – plazma - vzduch 60 s</i>	40
Tabulka 6: <i>Naměřené a vypočítané hodnoty pro BOPET – plazma - argon 5 s</i>	41
Tabulka 7: <i>Naměřené a vypočítané hodnoty pro BOPET – plazma - argon 30 s</i>	41
Tabulka 8: <i>Naměřené a vypočítané hodnoty pro BOPET – plazma - argon 60 s</i>	42
Tabulka 9: <i>Naměřené a vypočítané hodnoty pro LDPE – neplazmovaný</i>	42
Tabulka 10: <i>Naměřené a vypočítané hodnoty pro LDPE – plazma - vzduch 5 s</i>	43
Tabulka 11: <i>Naměřené a vypočítané hodnoty pro LDPE – plazma - vzduch 30 s</i>	43
Tabulka 12: <i>Naměřené a vypočítané hodnoty pro LDPE – plazma - vzduch 60 s</i>	44
Tabulka 13: <i>Naměřené a vypočítané hodnoty pro LDPE – plazma - argon 5 s</i>	44
Tabulka 14: <i>Naměřené a vypočítané hodnoty pro LDPE – plazma - argon 30 s</i>	45
Tabulka 15: <i>Naměřené a vypočítané hodnoty pro LDPE – plazma - argon 60 s</i>	45
Tabulka 16: <i>Naměřené a vypočítané hodnoty pro SCANBLEND – neplazmovaný</i>	46
Tabulka 17: <i>Naměřené a vypočítané hodnoty pro SCANBLEND – plazma - vzduch 5 s</i>	46
Tabulka 18: <i>Naměřené a vypočítané hodnoty pro SCANBLEND – plazma - vzduch 30 s</i> ..	47
Tabulka 19: <i>Naměřené a vypočítané hodnoty pro SCANBLEND – plazma - vzduch 60 s</i> ..	47
Tabulka 20: <i>Naměřené a vypočítané hodnoty pro SCANBLEND – plazma - argon 5 s</i>	48
Tabulka 21: <i>Naměřené a vypočítané hodnoty pro SCANBLEND – plazma - argon 30 s</i>	48
Tabulka 22: <i>Naměřené a vypočítané hodnoty pro SCANBLEND – plazma - argon 60 s</i>	49

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Stanovení disperzní a polární složky podle teorie OWRK	39
Graf 2: Závislost průměrné povrchové energie na délce expozice pro BOPET	49
Graf 3: Závislost průměrné povrchové energie na délce expozice pro LDPE.....	50
Graf 4: Závislost průměrné povrchové energie na délce expozice pro SCANBLEND	50

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Naměřené hodnoty kontaktních úhlů smáčení

Příloha P II: Grafické vyhodnocení metody OWRK

PŘÍLOHA P I: NAMĚŘENÉ HODNOTY KONTAKTNÍCH ÚHLŮ SMÁČENÍ

Naměřené hodnoty kontaktních úhlů pro vzorek (BOPET – neplazmovaný)

H ₂ O	Kontaktní úhel [°]	EG	Kontaktní úhel [°]	G	Kontaktní úhel [°]
	71,24		43,38		62,18
	69,79		40,65		63,13
	71,87		43,95		58,55
	68,57		42,49		63,74
	70,04		42,21		59,17
	72,33		41,55		60,76
	74,81		44,43		63,53
	72,07		43,91		65,34
	69,60		44,01		59,74
	71,27		43,41		60,64
	71,42		42,46		59,82
	68,13		41,97		59,30
	69,02		43,21		63,97
	72,82		41,87		62,87
	71,49		42,86		61,25
	67,91		41,39		65,14
	69,40		39,47		61,41
	68,49		42,78		60,59
	70,82		41,65		64,35
	69,35		43,65		64,98
	70,55		42,68		62,47
	72,95		42,47		57,03
	71,17		41,32		59,13
	68,80		39,47		62,97
	69,01		42,15		61,32
	71,25		43,42		60,37
	69,82		44,74		58,98
	66,86		43,68		62,41
	70,51		42,57		61,37
	71,16		43,23		62,55
průměr	70,4	průměr	42,6	průměr	61,6
odchylka průměru	0,3	odchylka průměru	0,2	odchylka průměru	0,4

Naměřené hodnoty kontaktních úhlů pro vzorek (BOPET – plazma vzduch 5 s)

H ₂ O	Kontaktní úhel [°]	EG	Kontaktní úhel [°]	G	Kontaktní úhel [°]
	31,56		0		30,71
	31,50		0		29,72
	30,40		0		31,80
	32,59		0		29,17
	31,35		0		32,91
	29,41		0		31,36
	28,75		0		32,43
	29,07		0		30,08
	28,97		0		30,65
	32,93		0		28,65
průměr	30,7	průměr	0	průměr	30,8
odchylka průměru	0,5	odchylka průměru	0	odchylka průměru	0,5

Naměřené hodnoty kontaktních úhlů pro vzorek (BOPET – plazma vzduch 30 s)

H ₂ O	Kontaktní úhel [°]	EG	Kontaktní úhel [°]	G	Kontaktní úhel [°]
	32,92		0		34,51
	34,99		0		34,28
	33,75		0		35,69
	35,12		0		37,78
	33,72		0		38,26
	37,38		0		37,17
	37,68		0		34,62
	31,24		0		35,94
	34,96		0		37,26
	33,87		0		37,61
	35,29		0		38,12
	33,48		0		36,44
	36,66		0		38,83
	36,36		0		34,91
	35,14		0		37,80
	35,23		0		38,12
	33,65		0		37,15
	32,15		0		35,47
	32,18		0		35,50
	32,15		0		36,75
průměr	34,4	průměr	0	průměr	36,6
odchylka průměru	0,4	odchylka průměru	0	odchylka průměru	0,3

Naměřené hodnoty kontaktních úhlů pro vzorek (BOPET – plazma vzduch 60 s)

H ₂ O	Kontaktní úhel [°]	EG	Kontaktní úhel [°]	G	Kontaktní úhel [°]
	56,91		29,24		51,49
	58,12		27,54		48,28
	57,40		28,44		51,55
	59,62		26,39		46,61
	56,98		25,97		47,77
	59,32		29,75		49,70
	58,67		26,95		51,33
	60,12		25,52		49,06
	59,74		25,50		46,67
	58,76		26,14		49,75
průměr	58,6	průměr	27,1	průměr	49,2
odchylka průměru	0,4	odchylka průměru	0,5	odchylka průměru	0,6

Naměřené hodnoty kontaktních úhlů pro vzorek (BOPET – plazma argon 5 s)

H ₂ O	Kontaktní úhel [°]	EG	Kontaktní úhel [°]	G	Kontaktní úhel [°]
	19,31		0		21,64
	19,47		0		22,33
	21,20		0		21,81
	20,15		0		23,97
	20,25		0		21,47
	22,79		0		22,69
	18,97		0		20,97
	20,36		0		21,68
	21,67		0		23,17
	22,34		0		19,41
průměr	20,7	průměr	0	průměr	21,9
odchylka průměru	0,4	odchylka průměru	0	odchylka průměru	0,4

Naměřené hodnoty kontaktních úhlů pro vzorek (BOPET – plazma argon 30 s)

H ₂ O	Kontaktní úhel [°]	EG	Kontaktní úhel [°]	G	Kontaktní úhel [°]
	31,73		0		24,70
	30,14		0		27,76
	32,15		0		26,40
	34,01		0		25,31
	33,20		0		25,74
	29,90		0		24,15
	30,24		0		26,00
	32,68		0		25,73
	30,68		0		24,17
	33,47		0		26,39
	33,14		0		26,41
	32,65		0		27,14
	31,98		0		26,32
	32,14		0		24,96
	29,47		0		23,99
	30,54		0		24,01
	29,85		0		25,70
	32,54		0		24,98
	34,06		0		23,47
	33,74		0		26,41
průměr	31,9	průměr	0	průměr	25,5
odchylka průměru	0,3	odchylka průměru	0	odchylka průměru	0,3

Naměřené hodnoty kontaktních úhlů pro vzorek (BOPET – plazma argon 60 s)

H ₂ O	Kontaktní úhel [°]	EG	Kontaktní úhel [°]	G	Kontaktní úhel [°]
	20,31		0		21,03
	20,09		0		20,52
	22,17		0		19,65
	22,68		0		22,78
	20,98		0		20,57
	21,67		0		21,44
	21,26		0		21,68
	21,65		0		20,97
	20,49		0		19,64
	20,36		0		20,74
průměr	21,2	průměr	0	průměr	20,9
odchylka průměru	0,3	odchylka průměru	0	odchylka průměru	0,3

Naměřené hodnoty kontaktních úhlů pro vzorek (LDPE – neplazmovaný)

H ₂ O	Kontaktní úhel [°]	EG	Kontaktní úhel [°]	G	Kontaktní úhel [°]
	92,20		85,62		95,37
	91,09		81,82		96,09
	89,98		78,19		95,68
	86,05		79,24		94,98
	88,02		79,57		92,45
	91,27		78,14		93,22
	93,25		78,46		94,10
	90,82		81,65		93,64
	91,40		77,76		90,56
	89,37		79,69		96,55
	91,17		82,92		92,20
	90,58		79,64		94,37
	90,99		81,33		96,12
	90,55		80,21		94,21
	92,54		81,69		93,12
	92,53		80,36		92,54
	93,68		78,20		93,54
	91,30		82,52		96,74
	90,15		78,33		94,58
	93,93		81,29		93,48
	93,97		76,68		91,15
	91,05		83,56		95,21
	92,39		78,71		95,70
	90,15		81,08		94,39
	93,66		80,17		90,08
	87,93		82,88		93,02
	92,75		80,17		91,35
	94,38		82,21		92,45
	93,11		79,72		94,57
	91,49		80,64		92,76
průměr	91,4	průměr	80,4	průměr	93,8
odchylka průměru	0,4	odchylka průměru	0,4	odchylka průměru	0,3

Naměřené hodnoty kontaktních úhlů pro vzorek (LDPE – plazma vzduch 5 s)

H ₂ O	Kontaktní úhel [°]	EG	Kontaktní úhel [°]	G	Kontaktní úhel [°]
	82,66		58,09		73,43
	83,87		60,02		75,08
	86,67		59,53		74,11
	81,33		60,73		72,88
	84,49		56,10		74,88
	83,12		57,71		74,27
	84,18		58,26		73,43
	82,92		59,63		76,42
	86,94		59,64		76,79
	83,10		59,14		73,16
průměr	83,9	průměr	58,9	průměr	74,4
odchylka průměru	0,6	odchylka průměru	0,5	odchylka průměru	0,4

Naměřené hodnoty kontaktních úhlů pro vzorek (LDPE – plazma vzduch 30 s)

H ₂ O	Kontaktní úhel [°]	EG	Kontaktní úhel [°]	G	Kontaktní úhel [°]
	60,20		43,1		64,49
	58,47		46,10		60,06
	62,00		46,00		62,55
	62,46		43,62		64,13
	63,60		44,12		61,38
	62,48		45,83		63,99
	61,63		44,45		61,12
	58,44		41,33		62,34
	62,13		43,01		59,32
	61,28		44,27		63,36
	59,36		45,36		60,55
	62,58		45,88		61,34
	61,58		44,24		61,03
	63,48		43,57		60,08
	65,41		42,69		63,60
	62,39		41,65		64,29
	59,14		45,36		63,90
	63,66		43,18		62,04
	58,18		43,18		63,77
	58,61		43,90		63,05
průměr	61,4	průměr	44,1	průměr	62,3
odchylka průměru	0,5	odchylka průměru	0,3	odchylka průměru	0,4

Naměřené hodnoty kontaktních úhlů pro vzorek (LDPE – plazma vzduch 60 s)

H ₂ O	Kontaktní úhel [°]	EG	Kontaktní úhel [°]	G	Kontaktní úhel [°]
	56,91		29,24		51,49
	58,16		27,54		48,24
	57,40		28,44		51,55
	59,62		26,39		46,61
	56,98		25,97		47,77
	59,32		29,75		49,70
	58,67		26,95		51,33
	60,12		25,52		49,06
	59,74		25,50		46,67
	58,76		26,14		49,75
průměr	58,6	průměr	27,1	průměr	49,2
odchylka průměru	0,4	odchylka průměru	0,5	odchylka průměru	0,6

Naměřené hodnoty kontaktních úhlů pro vzorek (LDPE – plazma argon 5 s)

H ₂ O	Kontaktní úhel [°]	EG	Kontaktní úhel [°]	G	Kontaktní úhel [°]
	71,63		54,48		66,15
	67,36		53,70		67,60
	69,41		51,03		68,14
	67,31		54,53		70,37
	69,12		52,03		73,40
	70,35		51,48		70,38
	68,94		52,07		69,47
	70,14		52,97		68,95
	71,13		53,74		68,48
	69,42		54,01		69,46
průměr	69,5	průměr	53,1	průměr	69,2
odchylka průměru	0,5	odchylka průměru	0,4	odchylka průměru	0,6

Naměřené hodnoty kontaktních úhlů pro vzorek (LDPE – plazma argon 30 s)

H ₂ O	Kontaktní úhel [°]	EG	Kontaktní úhel [°]	G	Kontaktní úhel [°]
	51,20		24,24		53,30
	50,63		27,53		50,58
	49,48		22,89		49,60
	50,27		23,41		52,03
	54,81		25,20		52,17
	48,14		24,06		51,67
	53,43		25,14		53,40
	46,89		24,32		49,78
	53,69		24,87		50,72
	49,22		22,65		50,64
	48,99		23,74		51,27
	51,97		24,87		52,16
	52,15		23,44		53,84
	50,22		22,99		54,28
	55,64		23,42		51,47
	50,63		23,88		52,64
	52,66		26,55		52,47
	52,50		25,14		53,74
	46,74		26,78		51,87
	46,58		24,27		52,12
průměr	50,8	průměr	24,5	průměr	51,9
odchylka průměru	0,6	odchylka průměru	0,3	odchylka průměru	0,3

Naměřené hodnoty kontaktních úhlů pro vzorek (LDPE – plazma argon 60 s)

H ₂ O	Kontaktní úhel [°]	EG	Kontaktní úhel [°]	G	Kontaktní úhel [°]
	62,35		35,57		40,83
	62,42		32,55		41,81
	65,15		35,15		43,08
	62,51		35,29		42,14
	64,58		30,16		43,67
	61,97		33,22		41,21
	63,27		31,96		42,88
	63,87		32,14		43,21
	62,15		33,68		42,98
	61,98		34,68		41,27
průměr	63,1	průměr	33,4	průměr	42,3
odchylka průměru	0,4	odchylka průměru	0,6	odchylka průměru	0,3

Naměřené hodnoty kontaktních úhlů pro vzorek (SCANBLEND – neplazmovaný)

H ₂ O	Kontaktní úhel [°]	EG	Kontaktní úhel [°]	G	Kontaktní úhel [°]
	83,32		53,80		66,28
	84,25		54,19		65,39
	85,95		51,26		67,64
	81,34		52,26		68,74
	79,17		54,51		67,60
	82,29		52,87		67,74
	74,31		56,15		67,22
	76,89		53,41		62,69
	74,86		55,96		64,92
	74,88		53,41		59,09
	79,04		52,02		64,66
	75,88		53,07		65,66
	80,88		52,02		65,00
	78,58		53,07		64,44
	77,01		47,16		69,54
	76,22		56,50		65,19
	77,12		48,16		67,57
	79,15		55,12		71,41
	82,15		55,31		66,28
	72,56		56,48		65,46
	77,68		55,18		67,64
	82,09		56,51		68,74
	83,60		55,18		67,63
	85,34		51,98		67,63
	83,50		51,87		65,95
	80,65		52,91		69,12
	76,39		53,41		65,64
	78,12		51,59		68,86
	80,87		52,43		65,68
	82,81		52,40		70,98
průměr	79,6	průměr	53,3	průměr	66,7
odchylka průměru	0,6	odchylka průměru	0,4	odchylka průměru	0,4

Naměřené hodnoty kontaktních úhlů pro vzorek (SCANBLEND – plazma vzduch 5 s)

H ₂ O	Kontaktní úhel [°]	EG	Kontaktní úhel [°]	G	Kontaktní úhel [°]
	37,71		15,52		42,31
	35,33		16,39		39,29
	37,47		16,40		40,57
	35,08		16,13		41,66
	36,35		15,32		41,78
	38,14		16,47		39,67
	37,64		17,10		38,99
	36,40		15,99		43,47
	34,24		15,47		42,15
	36,67		16,37		41,87
průměr	36,5	průměr	16,1	průměr	41,2
odchylka průměru	0,4	odchylka průměru	0,1	odchylka průměru	0,5

Naměřené hodnoty kontaktních úhlů pro vzorek (SCANBLEND – plazma vzduch 30 s)

H ₂ O	Kontaktní úhel [°]	EG	Kontaktní úhel [°]	G	Kontaktní úhel [°]
	58,62		37,95		52,51
	62,37		34,09		57,57
	61,30		34,69		56,42
	60,25		32,70		52,47
	55,62		33,07		55,82
	58,14		37,39		56,41
	62,39		36,61		52,49
	58,14		38,82		57,57
	59,15		36,95		56,42
	61,22		36,54		50,47
	62,55		34,73		55,86
	61,29		36,94		52,49
	60,32		36,81		57,57
	59,78		38,84		56,41
	58,64		37,63		50,47
	63,66		31,39		55,82
	64,12		37,58		52,45
	58,61		34,14		56,50
	61,30		32,67		57,60
	60,22		33,07		53,78
průměr	60,4	průměr	35,6	průměr	54,9
odchylka průměru	0,5	odchylka průměru	0,5	odchylka průměru	0,5

Naměřené hodnoty kontaktních úhlů pro vzorek (SCANBLEND – plazma vzduch 60 s)

H ₂ O	Kontaktní úhel [°]	EG	Kontaktní úhel [°]	G	Kontaktní úhel [°]
	37,89		0		27,22
	34,79		0		28,55
	40,44		0		27,46
	38,91		0		25,38
	39,36		0		29,14
	41,77		0		28,45
	39,93		0		27,12
	37,78		0		29,33
	40,12		0		27,69
	38,77		0		26,47
průměr	38,9	průměr	0	průměr	27,7
odchylka průměru	0,6	odchylka průměru	0	odchylka průměru	0,4

Naměřené hodnoty kontaktních úhlů pro vzorek (SCANBLEND – plazma argon 5 s)

H ₂ O	Kontaktní úhel [°]	EG	Kontaktní úhel [°]	G	Kontaktní úhel [°]
	39,25		13,03		26,06
	40,59		11,55		28,01
	37,28		15,67		26,09
	41,93		15,40		28,09
	38,91		14,77		27,15
	39,16		12,68		28,12
	41,64		13,29		27,68
	38,66		11,94		26,97
	40,23		14,68		28,32
	39,47		13,26		27,96
průměr	39,7	průměr	13,6	průměr	27,4
odchylka průměru	0,5	odchylka průměru	0,5	odchylka průměru	0,3

Naměřené hodnoty kontaktních úhlů pro vzorek (SCANBLEND – plazma argon 30 s)

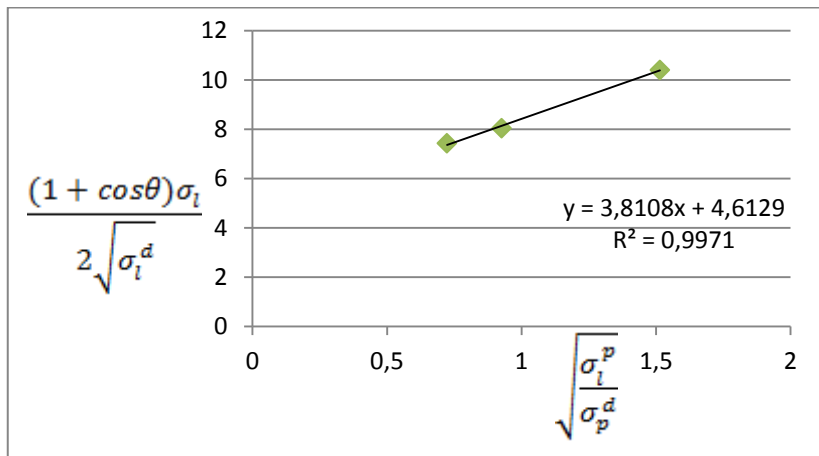
H ₂ O	Kontaktní úhel [°]	EG	Kontaktní úhel [°]	G	Kontaktní úhel [°]
	41,97		18,21		51,18
	42,58		18,06		49,53
	42,20		20,28		48,03
	43,53		20,57		47,99
	43,30		19,54		50,56
	43,53		20,81		51,44
	42,58		22,39		50,36
	44,94		19,12		50,22
	43,15		20,39		48,02
	42,68		21,74		47,05
	43,80		22,66		49,23
	42,16		21,47		50,98
	44,61		19,42		51,12
	43,16		20,68		52,06
	42,96		21,33		47,34
	41,85		20,10		49,30
	44,12		23,74		48,41
	39,41		21,30		50,12
	40,59		20,99		49,62
	43,71		20,41		52,01
průměr	42,8	průměr	20,7	průměr	49,7
odchylka průměru	0,3	odchylka průměru	0,3	odchylka průměru	0,3

Naměřené hodnoty kontaktních úhlů pro vzorek (SCANBLEND – plazma argon 60 s)

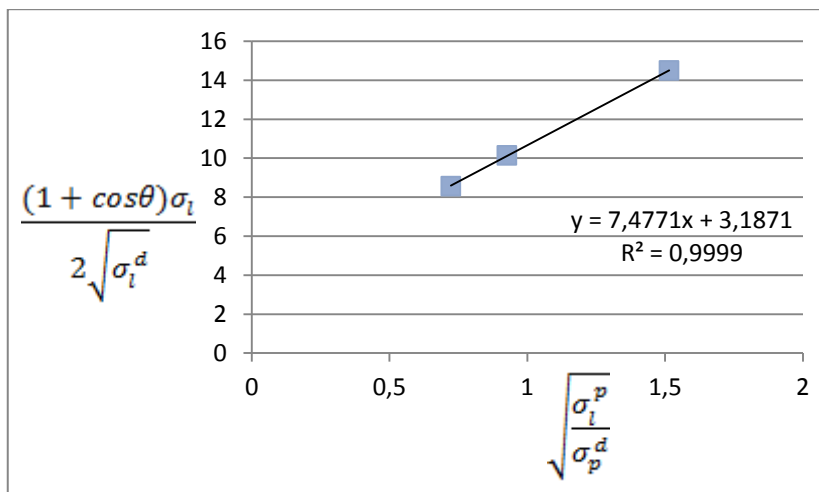
H ₂ O	Kontaktní úhel [°]	EG	Kontaktní úhel [°]	G	Kontaktní úhel [°]
	39,56		12,32		34,49
	37,18		10,82		30,57
	37,61		11,92		32,91
	39,61		12,41		33,74
	38,12		10,97		31,41
	35,94		11,44		29,97
	39,30		9,39		33,22
	39,98		10,66		32,47
	35,94		10,78		32,57
	37,60		9,03		29,66
průměr	38,1	průměr	10,9	průměr	32,1
odchylka průměru	0,5	odchylka průměru	0,4	odchylka průměru	0,5

PŘÍLOHA P II: GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ METODY OWRK

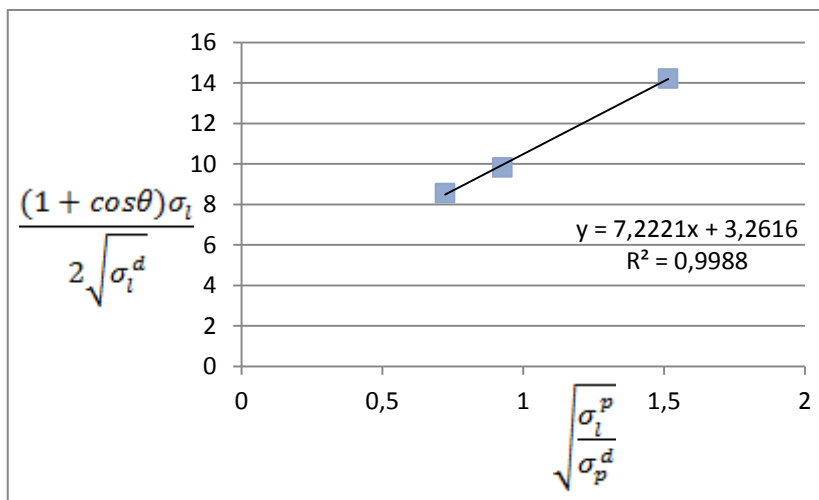
BOPET - neplazmovaný



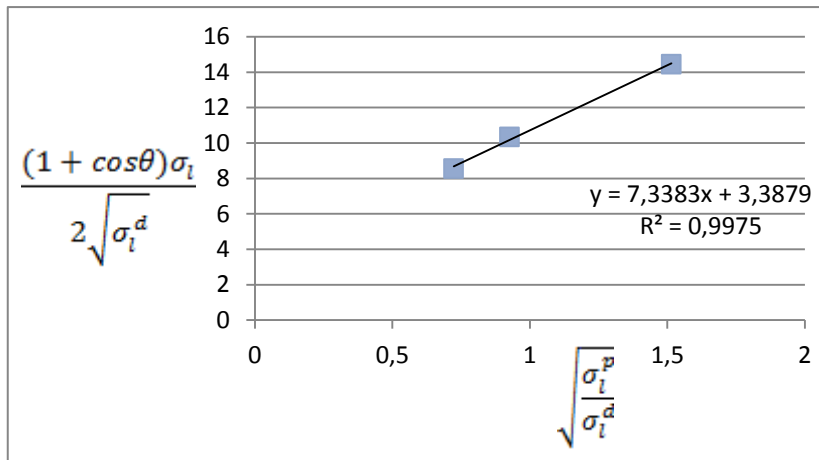
BOPET – plazmovaný – vzduch 5 s



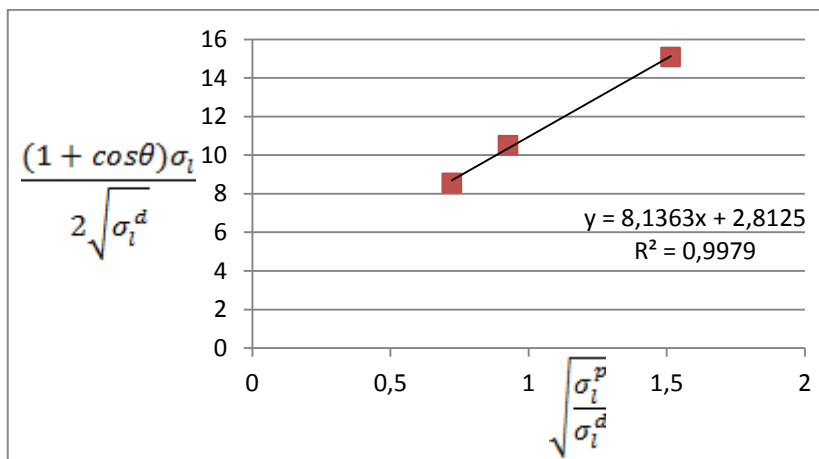
BOPET – plazmovaný – vzduch 30 s



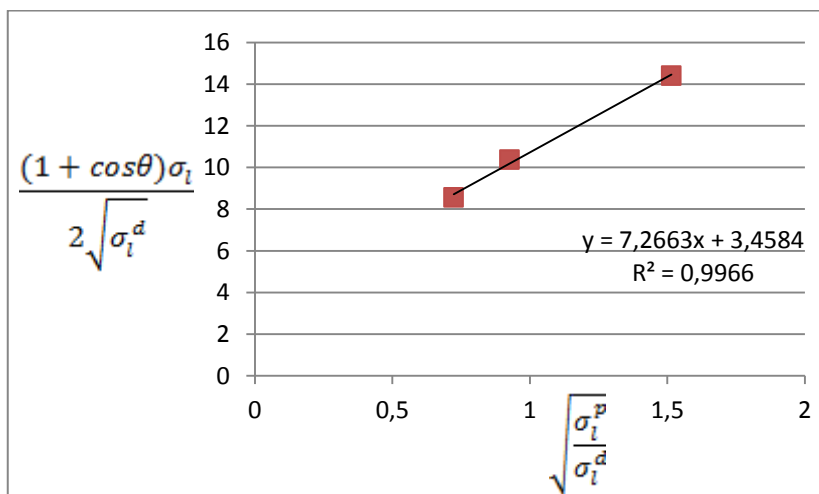
BOPET – plazmovaný – vzduch 60 s



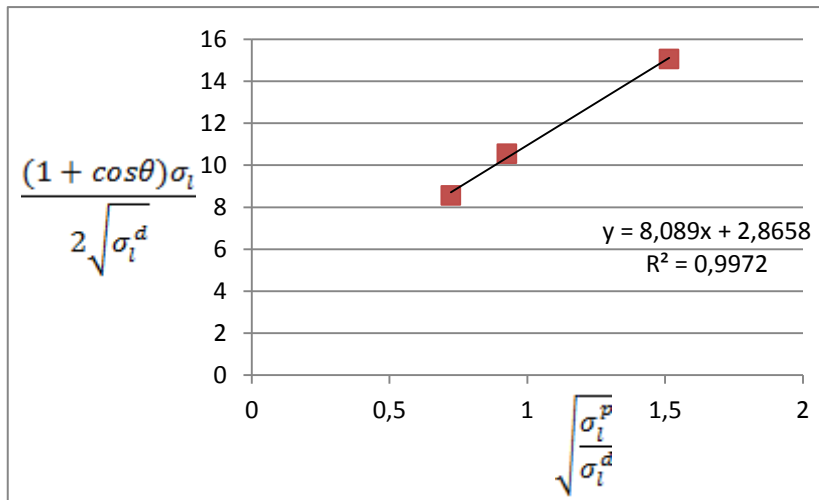
BOPET – plazmovaný – argon 5 s



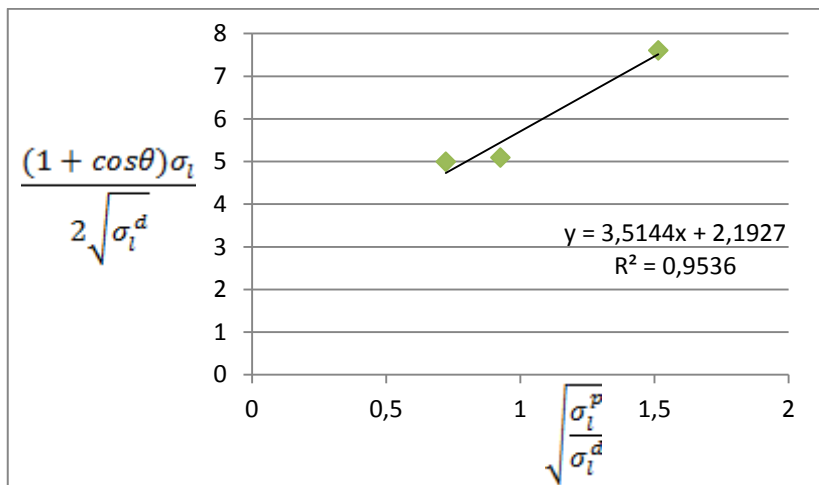
BOPET – plazmovaný – argon 30 s



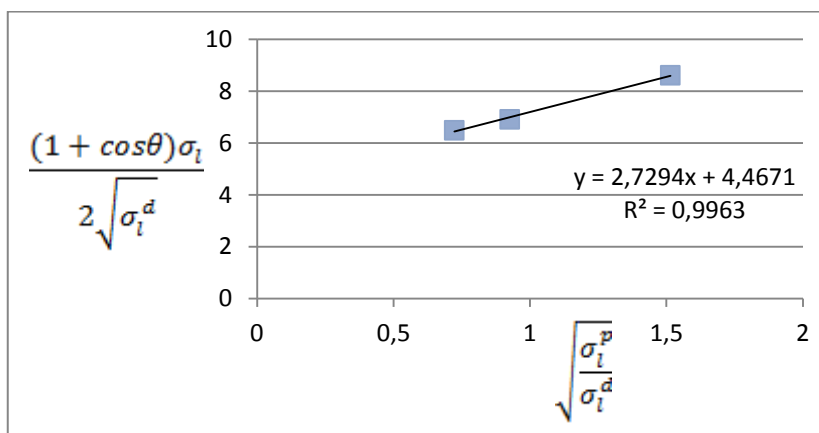
BOPET – plazmovaný – argon 60 s



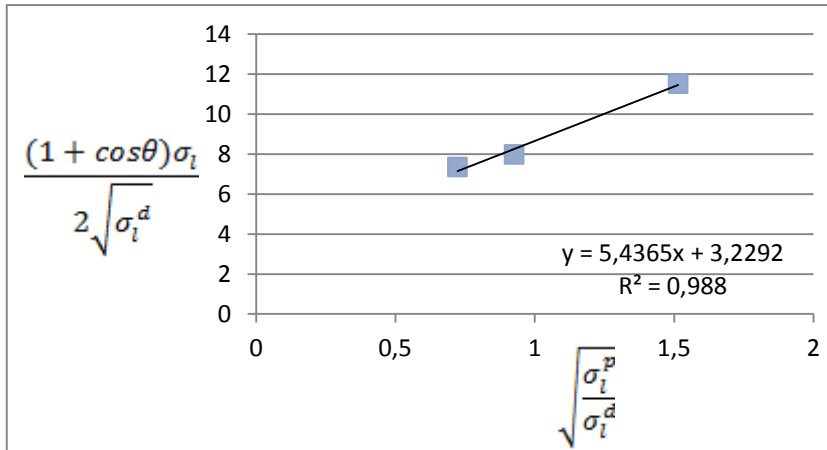
LDPE – neplazmovaný



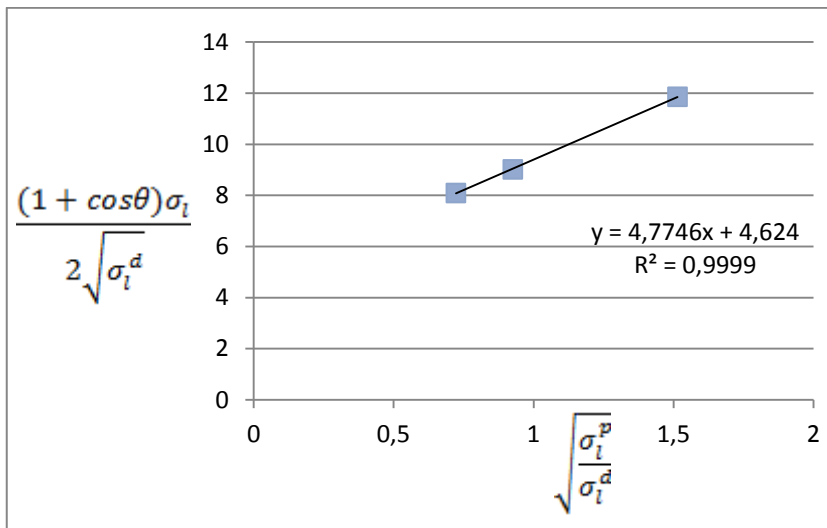
LDPE – plazmovaný – vzduch 5 s



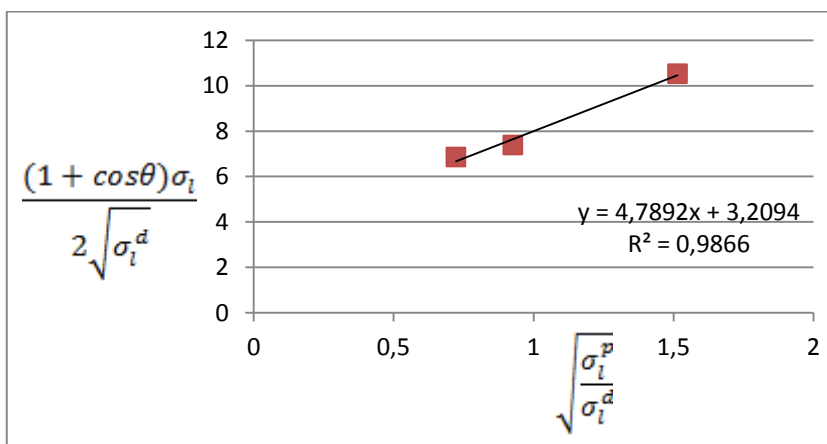
LDPE – plazmovaný – vzduch 30 s



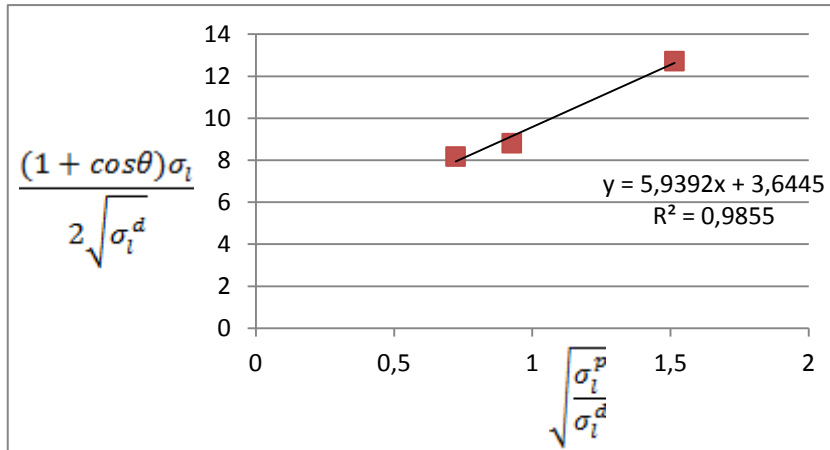
LDPE – plazmovaný – vzduch 60 s



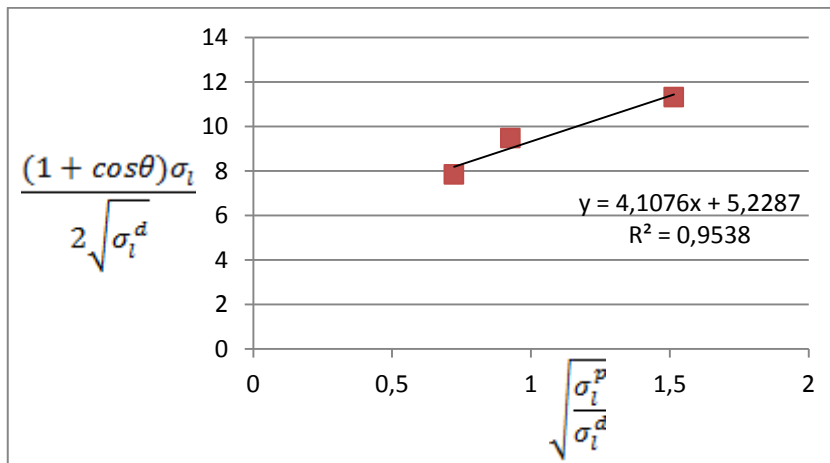
LDPE – plazmovaný – argon 5 s



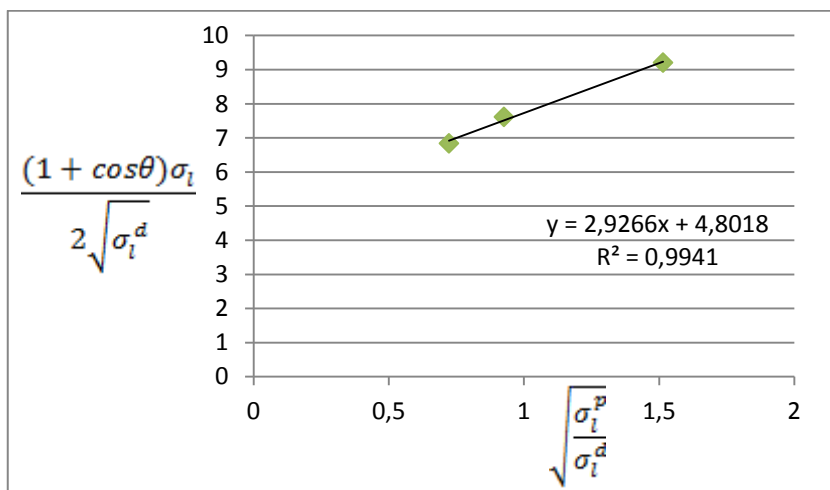
LDPE – plazmovaný – argon 30 s



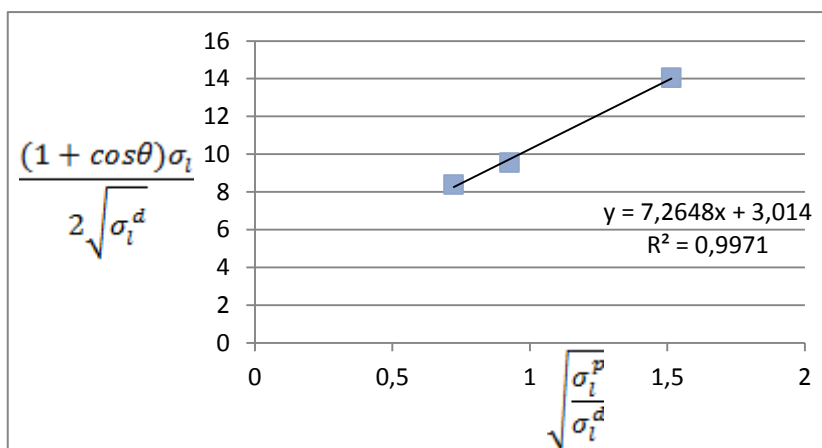
LDPE – plazmovaný – argon 60 s



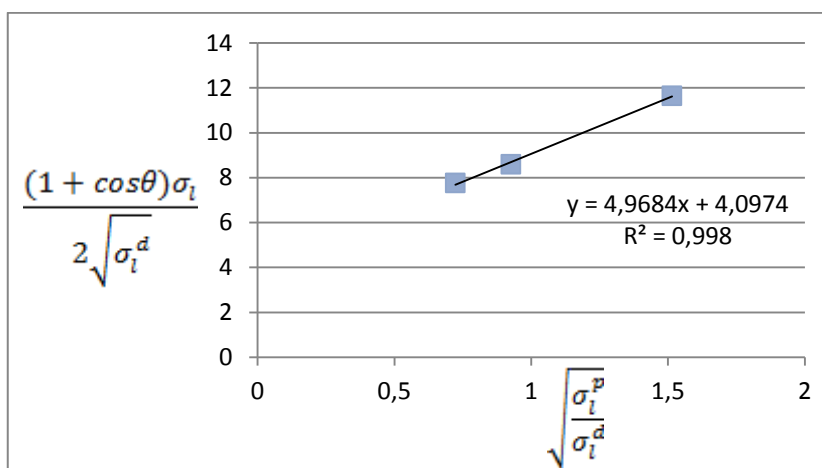
SCANBLEND – neplazmovaný



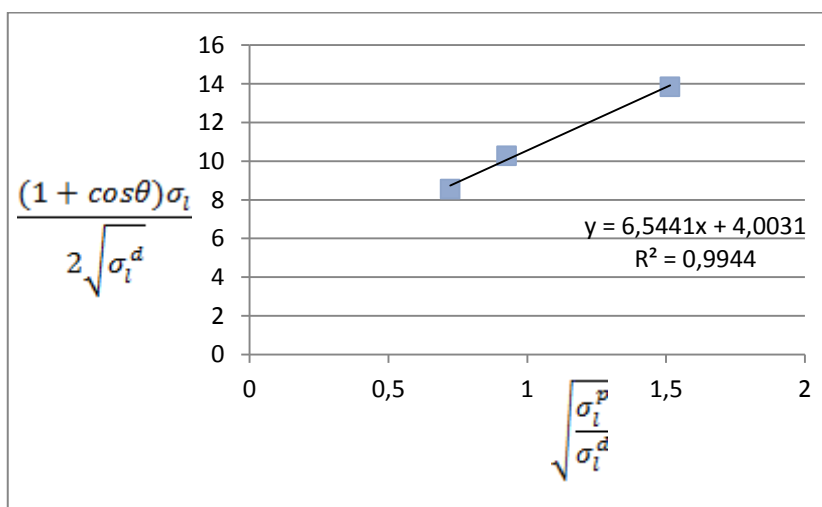
SCANBLEND – plazmovaný – vzduch 5 s



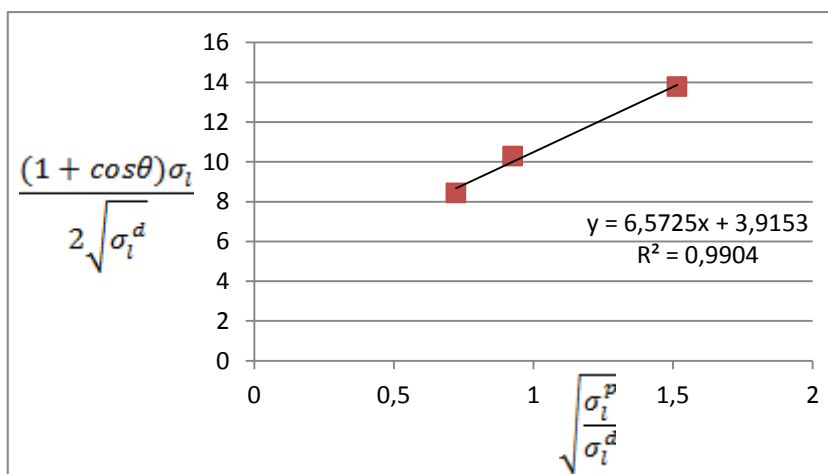
SCANBLEND – plazmovaný – vzduch 30 s



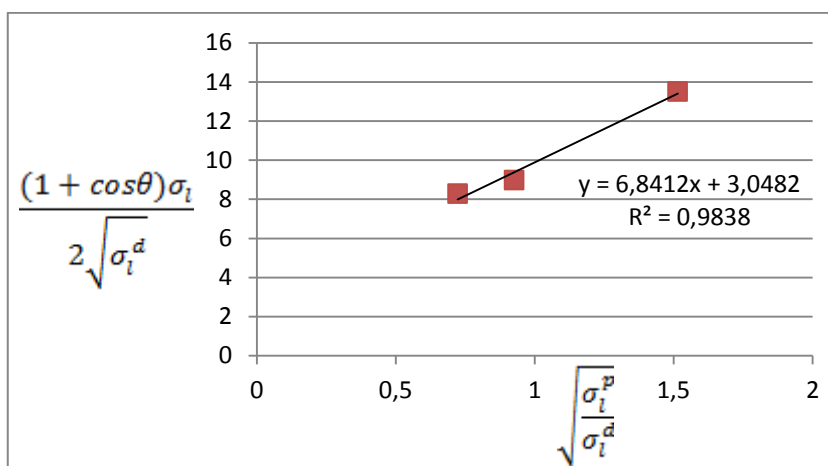
SCANBLEND – plazmovaný – vzduch 60 s



SCANBLEND – plazmovaný – argon 5 s



SCANBLEND – plazmovaný – argon 30 s



SCANBLEND – plazmovaný – argon 60 s

