

30TH INTERNATIONAL YOUNG PHYSICISTS' TOURNAMENT

TÝM TALNET

10 – Pulling Glasses Apart

PRAHA 2017

Obsah

1	Zadání úlohy	3
1.1	Originální znění	3
1.2	Překlad zadání	3
2	Úvod	3
3	Teorie	3
3.1	Kapilární mosty	3
3.2	Mechanický popis	4
3.3	Termodynamický popis	5
3.3.1	Povrchová energie materiálu	5
3.3.2	Kontaktní úhly smáčení	6
3.4	Vliv drsnosti povrchu	6
4	Experimentální metodika	7
4.1	Experimentální zařízení	7
4.2	Měření smáčivosti skel	8
4.3	Měření plochy pod sklem	9
4.4	Měření povrchového napětí roztoku manganistanu	10
5	Výsledky	10
5.1	Tlakové rozložení a jeho vliv	11
5.2	Závislost síly na ploše	12
5.2.1	Závislost síly na objemu a poloměru	13
5.3	Závislost síly na drsnosti povrchu	14
5.4	Závislost síly na povrchovém napětí a jeho ovlivnění hypermanganem	14
6	Diskuse	16
7	Závěr	17

1 Zadání úlohy

1.1 Originální znění

Put a thin layer of water between two sheets of glass and try to separate them. Investigate the parameters affecting the required force.

1.2 Překlad zadání

Vytvořte tenkou vrstvičku vody mezi dvěma skleněnými destičkami a pokuste se je oddělit. Prozkoumejte parametry ovlivňující potřebnou sílu.

2 Úvod

Prvotní úvahou při řešení úlohy Pulling Glasses Apart je způsob odtržení skel od sebe, jelikož se zde nabízejí 2 možné způsoby. Prvním z nich je odtržení skel kolmo od sebe a druhým jejich podélné sesouvání. V rámci našeho řešení jsme se rozhodli skla odtrhávat kolmo od sebe a zaměřit se na parametry ovlivňující právě tento způsob odtržení. Tato metoda byla použita z důvodu lepší experimentální proveditelnosti a dle našeho názoru také více odpovídá zadání. Na základě teorie jsme se rozhodli sledovat parametr přilnavosti vody k danému povrchu skla, tvorbu obrazových záznamů plochy vody pod sklem před jeho odtržením a jejich následné zpracovávání, použití různých typů skel o odlišné drsnosti povrchu a měření povrchové energie skel, která nám pomohla zároveň zjistit její polární a disperzní složky. Výsledky experimentů byly použity pro zjištění vlivu podtlaku, který při odtrhávání skel vzniká, a zaměřením se na jeho působení v průběhu odtrhávání skel. Zároveň se nám také v rámci experimentů podařilo potvrdit závislosti předpovězené v teorii.

3 Teorie

Počáteční definice¹:

Povrchová energie - hodnota povrchové energie je číselně rovna hodnotě **povrchového napětí**, liší se jednotkou, která je pro povrchovou energii [J/m^2] a pro povrchové napětí [N/m]

Fáze - část zkoumaného systému, v níž jsou vlastnosti konstantní nebo se spojitě mění v prostoru; jednotlivé fáze jsou odděleny **fázovým rozhraním** [5]

3.1 Kapilární mosty

Díky kapilárním silám dochází na rozhraní prostředí vody a skla mezi dvěma deskami ke vzniku adheze a jejich spojení pomocí kapilárních mostů (pozn.: z anglického překladu „capillary bridges“)[3]. Právě tyto kapilární mosty jsou způsobeny snahou vody mít co nejmenší možný povrch, jelikož molekuly kapaliny v objemové fázi mají menší energie než molekuly

¹Tato tvrzení budou později v textu vysvětlena.

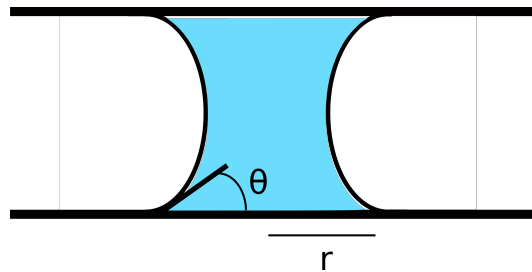
v povrchové fázi². Jedná se tedy o přirozený jev daný snahou systému o dosažení co nejmenší možné energie a zároveň také vychází ze smáčivosti daného povrchu, čili interakce molekul na rozhraní prostředí, který spolu s kontaktním úhlem smáčivosti popisuje schopnost vody přilnout ke sklu a určuje tak i vznikající kapilární mosty.

3.2 Mechanický popis

Mechanický popis soustavy vychází z makroskopického pohledu na systém. Celková síla \vec{F} potřebná pro odtržení desek od sebe je tvořena dvěma složkami \vec{F}_1 a \vec{F}_2 , přičemž jedna z nich je generována rozdílem tlaku a druhá mezipovrchovým napětím [3]. Síla F_1 vzniká v důsledku rozdílu tlaku mezi jednotlivými deskami a je definována následovně:

$$F_1 = \Delta p \pi r^2 \quad (1)$$

kde Δp je rozdíl tlaku mezi jednotlivými deskami³ a r poloměr vzniklého útvaru pod deskou (viz Obr. 1)[3].



Obrázek 1: Tvorba kapilárního mostu mezi dvěma skly a kontaktní úhel θ

Dále síla F_2 je generována mezipovrchovým napětím γ ($= \sigma_{lg}$ ⁴) na rozhraní fázového prostředí voda-vzduch, které je popsáno pomocí kontaktního úhlu θ [3](viz Obr. 2):

$$F_2 = 2\pi r \gamma \sin \theta \quad (2)$$

Z hlediska rovnováhy systému bereme v úvahu existenci tří fázových rozhraní, která uvažujeme jako tři různé plochy a jejich povrchové energie σ_{sg} , σ_{lg} a σ_{sl} [2](viz Obr. 2⁵).

Celková síla potřebná k odtržení desek od sebe \vec{F} působící kolmo na desky je tedy výsledkem těchto dvou sil⁶

$$\vec{F} = -(\vec{F}_1 + \vec{F}_2) \quad (3)$$

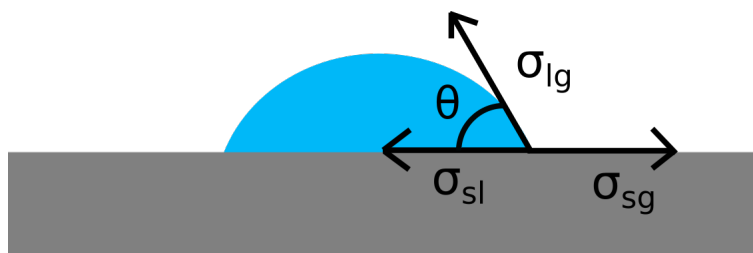
²Na molekulu v objemové fázi působí mezimolekulární síly ze všech směrů rovnoměrně, výslednice sil je tedy nulová. Naopak molekula v povrchové fázi je přitahována mezimolekulárními silami pouze z jedné strany a má tendenci tento povrch opouštět [5].

³Z důvodu povrchového napětí působí na rozhraní kapalina-plyn zvýšený tlak.

⁴Tento vztah bude později vysvětlen v kapitole 3.3.1

⁵Kontaktní úhel bude spolu s jednotlivými povrchovými energiemi popsán později.

⁶V závislosti na jednotlivých složkách síly tedy předpokládáme závislost celkové síly na ploše, rozdílu tlaku, mezipovrchovému napětí a smáčivosti daného skla (popisuje kontaktní úhel).



Obrázek 2: Kontaktní úhel θ a jednotlivé povrchové energie

3.3 Termodynamický popis

Termodynamický popis zkoumá různorodost vlastností fází danou specifickým chováním molekul v oblasti těchto fází, tedy vlastnostmi systému na fázovém rozhraní.

3.3.1 Povrchová energie materiálu

Povrchová energie γ je v termodynamice definována jako přírůstek Helmholtzovy energie ⁷ připadající na jednotku plochy fázového rozhraní:

$$\gamma = \frac{dA}{ds} \quad (4)$$

Povrchová energie γ [Jm^{-2}] v tomto významu odpovídá množství práce nutné na izotermické vytvoření jednotkové plochy povrchu fázového rozhraní. Veličina γ nevystupuje často pouze ve významu povrchové energie, ale lze ji současně považovat za sílu působící na jednotku délky obvodu ohraničující povrch a působící směrem dovnitř tohoto povrchu ve směru kolmém k jeho obvodu. Tato síla se nazývá povrchové napětí σ [Nm^{-1}]. Pro kapaliny je povrchové napětí číselně rovno povrchové energii ($\gamma = \sigma$). Pro pevné látky je problém komplikovanější - objevují se zde současně se skalární velikostí povrchové energie, číselně rovné povrchovému napětí, ještě jiná veličina (někdy rovněž označována jako „povrchové napětí“), zahrnující mechanická napětí v povrchových vrstvách, která mají tenzorový charakter⁸[2].

⁷Helmholtzova energie A - dříve nazývána jako „volná energie“ - je stavová veličina pro termodynamickou rovnováhu a slouží jako termodynamické vyjádření odpovídající konané práci za konstantní teploty. Termodynamická definice:

$$A = U - TS$$

kde U je vnitřní energie a S entropie. [1]

⁸V praxi jsou hodnoty povrchové energie zjišťovány pomocí několika nepřímých metod, například z měření kontaktních úhlů (viz dále), metodou štěpení, metodou nulového tečení, apod. Často bývají zájmem zkoumání povrchové energie plastů, pro které je typická velice nízká až střední polarita povrchu. Například hodnoty volné povrchové energie pro polypropylen odpovídají zhruba 33,52 mN/m (= mJ/m²), z toho polární složku tvoří pouze 2,31 mN/m. Převládá tedy složka disperzní: 31,21 mN/m. U skel jakožto polárních materiálů bývají tyto hodnoty odlišné, například z celkové volné povrchové energie 53,35 mN/m tvoří polární složku 24,09 mN/m.

3.3.2 Kontaktní úhly smáčení

Základní vlastnosti povrchových jevů pro jednosložkové soustavy můžeme v mnohém použít také pro soustavy vícesložkové, musíme zde ovšem brát v úvahu zvláštnosti způsobené částečnou vykompenzovaností mezimolekulárních interakcí dle molekulární příbuznosti povahy fází. Smáčivost materiálu jako taková je schopnost kapaliny se po daném povrchu rozestřít, respektive k němu přilnout, a vychází právě z povrchových energií (povrchová energie je kvantitativní charakteristikou energetických bilancí smáčení i vlastností daného povrchu [2]). Jeden z hlavních parametrů, který smáčivost popisuje, je kontaktní úhel. Ten je definován jako úhel svírající tečnou k povrchu kapky v místě rozhraní s pevným materiálem (viz Obr. 2). Menší hodnoty kontaktního úhlu odpovídají dobré smáčivosti povrchu, kdy jsou zároveň molekulární povahy kapaliny a pevné látky podobné, a obráceně [4]. Zakřivení dané kapky vzniká v důsledku tendence systému zmenšit svůj povrchu a zároveň kapilární jevy vznikají jako důsledek zakřivení.

Kontaktní úhel θ je také definován pomocí povrchových energií tří odlišných ploch vzniklých na fázovém rozhraní (σ_{sg} = povrchové napětí na rozhraní fází mezi pevnou látkou a plynem, σ_{lg} = povrchové napětí na rozhraní fází mezi kapalinou a plynem, σ_{sq} = povrchové napětí na rozhraní fází mezi pevnou látkou a plynem - Obr. 2), což vyjadřuje Youngova rovnice⁹[3]:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{sq} - \sigma_{ls}}{\sigma_{lg}} \quad (5)$$

Díky znalosti kontaktního úhlu jsme také schopni vypočítat volnou povrchovou energii materiálu za využití různých modelů. Ty se od sebe liší hlavně způsobem výpočtu volné povrchové energie a také tím, pro které materiály jsou vhodnější.

3.4 Vliv drsnosti povrchu

Odlišné povrchové vlastnosti pevných látek ve směru jeho drsnosti poměrně podstatně ovlivňují jeho smáčivost. Tento stav se kvantitativně popisuje koeficientem drsnosti k_d :

$$k_d = \frac{S_{real}}{S_{ideal}} = \frac{1}{\cos \chi} \quad (6)$$

kde S_{real} je reálný povrch pevné látky s nerovnostmi, S_{ideal} je idealizovaný povrch pevné látky, χ je úhel svíraný hranou nerovnosti s povrchem pevné látky. Jestliže se na povrchu pevné látky vyskytují nerovnosti, je reální povrch pevné látky S_{real} větší než idealizovaný povrch S_{ideal} . Koeficient drsnosti je tedy jinými slovy definován jako poměr reálné plochy povrchu k jeho projekci na idealizovaný rovinný povrch.

Ve výsledku tedy drsnost povrchu zesiluje jev smáčení. Pokud kapalina daný povrch smáčí

⁹Pokud se disperzní složky povrchového napětí polárních a nepolárních fází příliš neliší, pak je povrchové napětí na rozhraní nepolární pevné látky a polární kapaliny určeno nedisperzní složkou povrchového napětí této kapaliny - σ_{lg} [2].

dobře, drsnost daného povrchu ještě toto smáčení snižuje (resp. kontaktní úhel). Naopak u kapaliny, která daný povrch nesmáčí, stupňuje drsnost povrchu toto nesmáčení [2]. Pro naše pozdější realizační účely jsme si vyjádření drsnosti povrchu pozměnili a založili ho právě na stejném objemu, který byl používán jak pro hladký i drsný povrch. Dle odlišnosti následných vzniklých ploch pod sklem jsme pak následně mohli definovat hrubost skla H :

$$\begin{aligned}
 V_0 &= V_H \\
 \pi r_0^2 d &= \pi r_H^2 (d + H) \\
 H &= \frac{\pi r_0^2 d - \pi r_H^2 d}{\pi r_H^2} \quad (7)
 \end{aligned}$$

kde V_0 je počáteční objem kapaliny totožný s objemem kapaliny pod sklem s drsným povrchem V_H , d je tloušťka vrstvy a H je tedy definováno jako průměrné zvýšení vrstvy d hrubého skla. Takto námi definovaná hrubost H má tedy rozměr v jednotkách délky.

4 Experimentální metodika

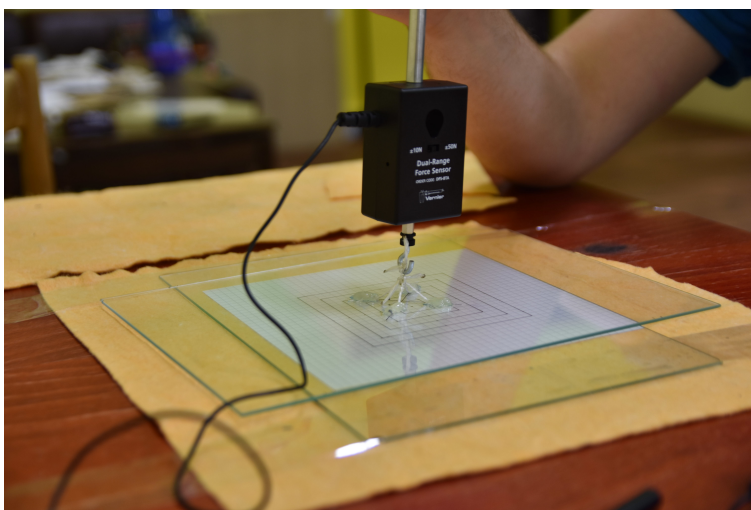
4.1 Experimentální zařízení

Pro experimenty jsme se rozhodli použít několik různých typů skel, které se od sebe lišily typem povrchu, svojí velikostí, tloušťkou a také hmotností. Seznam skel spolu s jejich parametry je uveden v tabulce.

Sklo	Rozměry ($\pm 0,1$) [cm]	Hmotnost [kg]	Povrch (popis)
Tabulkové sklo	29,7 x 21,0	(0,283 \pm 0,053)	hladký
Hladký povrch	23,4 x 17,0	(0,255 \pm 0,051)	hladký
Drsný povrch	23,4 x 17,0	(0,255 \pm 0,051)	drsný

Pro sérii experimentů, ve kterých se zkoumala závislost síly potřebné k odtržení na obsahu plochy pod sklem, jsme použili hladká obdélníková skla (v tabulce a pozdějších výsledcích označována jako „tabulkové sklo“). U skel rozlišovaných dle povrchu jsme zkoumali hlavně závislost na jeho vlastnostech, drsnosti a povrchové energii, přičemž se jednalo o sklo s odlišným povrchem z každé strany. Tedy z jedné strany byl povrch hladký a z druhé drsný. Kvůli celkové velikosti síly a praktickému odtrhování skel od sebe jsme se zaměřili spíše na větší typy skel, jelikož u menších skel bylo problematictější měření celkové síly potřebné k odtržení a také docházelo k velkým nepřesnostem. Z tohoto důvodu jsme menší typy skel z našich experimentů vyřadili.

Všechna skla byla upravena tak, že jsme využili jejich obdélníkového tvaru a položili je na sebe kolmo, aby výsledný obrazec tvořil čtverec z důvodu tvarové symetričnosti plochy. Ke svrchnímu sklu byly v jeho těžišti pomocí tavné pistole připevněny úchytné provázky pro možnost zavěšení siloměru. Tyto provázky byly zkonstruovány ve směru úhlopříček čtverce a přímo nad jeho těžištěm byly vedeny volně pro možnost úchyty siloměru (viz Obr. 3). Spodní sklo bylo následně připevněno ke stolu.



Obrázek 3: Uchycení skla k siloměru

Pro měření síly byla použita sonda siloměru spolu s měřícím systémem Vernier. Přímo konkrétní průběh experimentu probíhal tak, že jsme zahákli háček siloměru k připravenému úchytu na skle a tahali silou směrem nahoru co konstantně rostoucí silou do jeho odtržení (měření síly v závislosti na čase). Z naměřených hodnot jsme pak vyčetli maximální sílu jakožto nejvyšší hodnotu v momentě odtržení.

4.2 Měření smáčivosti skel

Pro bližší specifikaci povrchu skel jsme se rozhodli pro změření kontaktních úhlů a povrchové energie pro možnost porovnání mezi jednotlivými typy skel. Toto měření jsme prováděli na specializovaném stroji See System na katedře Fyzikální chemie PŘF UP, který se zaměřuje na měření kontaktních úhlů. Principiálně je měření založené na nanášení malých kapek pomocí speciální mikrostříkačky o objemu 3 - 5 μl na povrch daného materiálu, v našem případě tedy skla (Obr. 4). Přístroj pak dané kapky snímá kolmo z boku a po zvolení dvou základních styčných bodů základny, kde povrch kapky přechází v povrch skla, a několika bodů na vnějším povrchu kapky přístroj dopočítá její tvar a zároveň také kontaktní úhly. Pomocí nich a známého povrchového napětí smáčivé kapaliny vypočítá následně povrchovou energii dle zvoleného modelu. Pro výpočetní model OWRK¹⁰ je zapotřebí dvou smáčících kapalin, přičemž jedna z nich je polární a druhá nepolární, v našem případě destilovaná voda a diiodomethan (Obr. 5). Výsledné naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce:

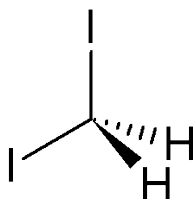
Sklo	Voda / diiodomethan [°]	Povrch. energie [mJ/m ²]	Pol. složka [mJ/m ²]
Tabulkové sklo	(18,85 ± 1,22) / (51,17 ± 2,81)	(71,20 ± 1,47)	(37,58 ± 2,14)
Hladký povrch	(10,55 ± 0,57) / (50,81 ± 2,51)	(73,58 ± 0,66)	(39,76 ± 1,55)
Drsný povrch	(18,04 ± 1,02) / (49,00 ± 3,21)	(71,86 ± 1,34)	(37,03 ± 2,10)

¹⁰V tomto modelu je adhézní energie určena z geometrického průměru a je rozdělena na disperzní a polární část.

Naměřené hodnoty volné povrchové energie pro drsný povrch odpovídají definici zmíněné výše, jelikož nám pro drsný povrch vyšla menší povrchová energie než pro povrch hladký (u stejného typu skla). Voda ve všech případech smáčela povrch skla (kontaktní úhel $\theta < 90^\circ$) a tedy u drsného povrchu došlo ještě k jeho zvýšení.¹¹ Zároveň je také polární složka energie u „hladkého povrchu“ větší než u „drsného povrchu“, což způsobuje lepší přilnavost vody jakožto polární kapaliny k polárnímu povrchu skla (menší kontaktní úhel).



Obrázek 4: Kapka destilované vody na povrchu skla



Obrázek 5: Molekulární struktura diiodomethanu H_2I_2

4.3 Měření plochy pod sklem

Z důvodu figurování plochy a obvodu vody pod sklem v teorii (síla F_1 a F_2) jsme se v rámci experimentů a jejich zpracování zaměřili také právě na jejich měření. Použili jsme k tomu pro obarvení vody manganistan draselný, abychom velikost plochy mohli následně vypočítat ze snímků (Obr. 6).

Podobné snímky jako na Obr. 6 jsme následně zpracovávali pomocí obkreslování obvodové křivky plochy v programu Inkscape. V něm jsme také následně vypočítali obvod a obsah této plochy v pixelech (px^2). Díky použití čtvercové sítě jsme pak mohli také vypočítali délku jednoho čtverečku, jehož délku v reálné velikosti jsme znali a přepočítali tak obvod a obsah celé plochy na centimetry (resp. cm^2).

¹¹Skla označená jako „tabulkové sklo“ jsou druhově odlišné od skel lišícími se pouze stranami povrchů.



Obrázek 6: Plocha vody obarvené manganistanem pod sklem

4.4 Měření povrchového napětí roztoku manganistanu

Povrchové napětí různých koncentrací roztoku manganistanu draselného bylo měřeno pomocí kapkového odtrhávání. K tomu jsme využili byretu nastavenou na stejně velký průtok pro všechny roztoky a nechávali tak postupně odkapávat kapky, které jsme následně zvážili a vypočítali hmotnost jedné kapky. Díky zachování poměru hmotností odtržených kapek a povrchových napětí jsme pomocí vody o známém povrchovém napětí zjistili povrchová napětí různých koncentrací roztoků manganistanu draselného a jeho vlivu na změnu povrchového napětí.

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$$
$$\sigma_2 = \sigma_1 \frac{M_2}{M_1} \quad (8)$$

kde M_1 a M_2 jsou hmotnosti kapek daných kapalin po odtržení a σ_1 a σ_2 odpovídající povrchová napětí kapalin.

5 Výsledky

Všechny experimenty s danou obměnou parametru jsme opakovali pětkrát, přičemž jsme pro měření použili 13 odlišných objemů. Zaměřili jsme se hlavně na měření závislosti na ploše a objemu použité kapaliny mezi skly. Zároveň jsme zkoumali parametr drsnosti povrchu a tedy i typu skel. Jelikož jsme pro experimenty využili roztoky manganistanu draselného, který potenciálně mohl ovlivnit povrchové napětí kapaliny, jakožto jednoho z parametrů vycházející v rovnicích, zkoumali jsme i tento parametr.

5.1 Tlakové rozložení a jeho vliv

Při zkoumání vlivu tlaku jsme se rozhodli využít vlastností škrobu smíchaného s vodou, kdy se chová téměř jako dokonalá newtonská kapalina a také reaguje na změny tlaku tuhnutím. Po odtržení skel jsme tak zkoumáním vzniklých útvarů byli schopni více popsat probíhající tlakové změny.



Obrázek 7: Útvar vzniklý ze škrobu po odtržení skel

Z Obr. 7 je tedy patrné, že v místě, kde je nahromaděno největší množství škrobu, byl v době před odtrhnutím největší podtlak a toto místo se zároveň oddělilo jako poslední. Oddělování skel tedy postupovalo od krajů do středu daného útvaru.

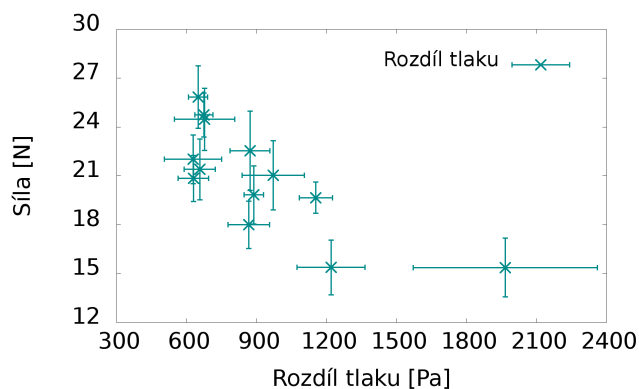
Z rovnic (1) a (2) jsme také schopni vypočítat rozdíl tlaků Δp , jelikož obvod $2\pi r$ a obsah πr^2 byly zjištěny z následného zpracování obrazu plochy, úhel θ jsme získali z měření povrchové energie (resp. smáčivosti)¹², hodnotu γ taktéž. Tudíž:

$$\begin{aligned} F &= F_1 + F_2 \\ F - 2\pi r \gamma \sin \theta &= \Delta p \pi r^2 \\ \Delta p &= \frac{F - 2\pi r \gamma \sin \theta}{\pi r^2} \end{aligned} \quad (9)$$

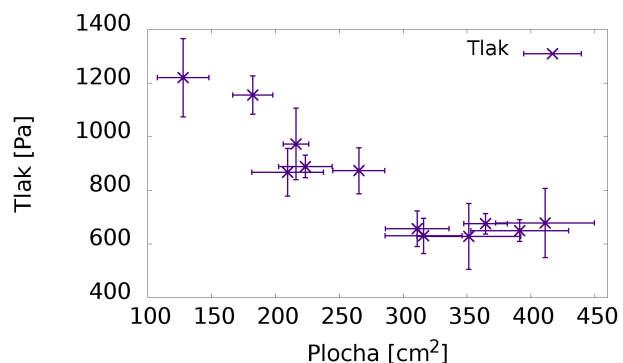
Dle vztahu (9) byly získány hodnoty rozdílu tlaku v různých experimentech.

Z výsledků je tedy patrné, že pro malé plochy byl největší rozdíl tlaků (resp. podtlak), což odpovídá také obecné definici tlaku $p = \frac{F}{S}$. Zároveň ovšem síla odtržení nerostla ekvivalentně k rostoucí ploše, tudíž pro velké plochy byly rozdíly tlaku menší než pro malé plochy.

¹²Zde jsme použili hodnoty kontaktního úhlu vody, ačkoliv jsme v reálných experimentech použili roztok hypermanganu. Z důvodu nepříliš odlišné hodnoty povrchového napětí (viz dále) jsme tedy tento rozdíl zanedbali.



(a) Graf závislosti síly odtržení na rozdílu tlaku

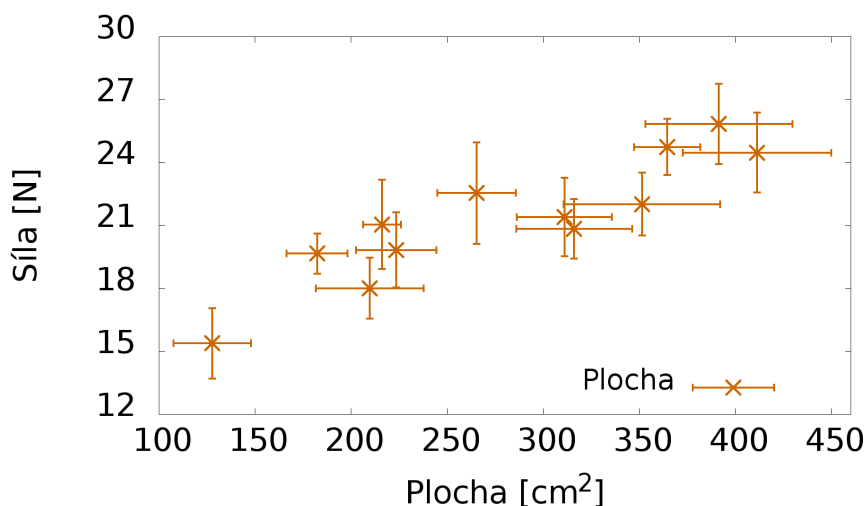


(b) Graf závislosti rozdílu tlaku na ploše

Obrázek 8: Vypočítané hodnoty rozdílu tlaku

5.2 Závislost síly na ploše

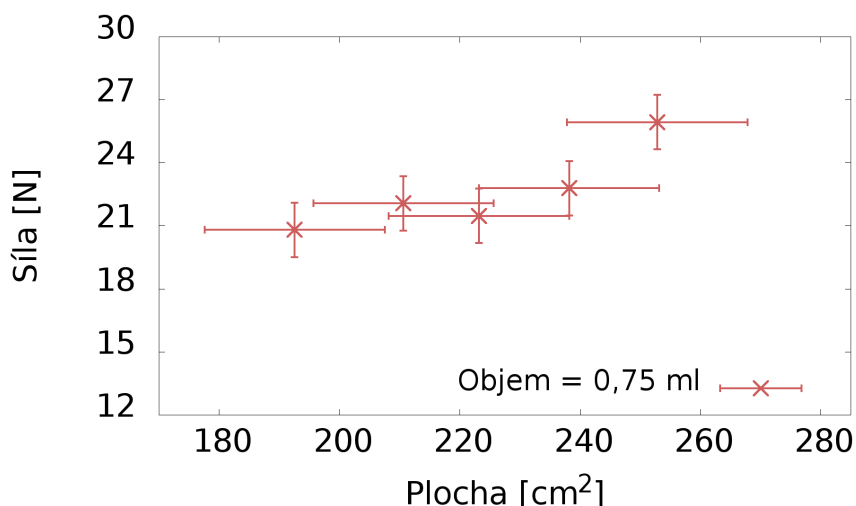
Jak také z teorie vyplývá, spolu s velikostí plochy by měla růst síla potřebná k odtržení skel. Tento předpoklad podporuje také výsledek našeho měření (Obr. 9). Výsledné hodnoty nejsou proloženy křivkou, jelikož z teorie neznámé přímo přesný průběh, ale dle našeho očekávání (což z teorie vyplývá) je síla v závislosti na velikosti plochy rostoucí.



Obrázek 9: Graf závislosti síly potřebné k odtržení skel na ploše vody pod sklem

Pro další názornou ukázkou jsme vytvořili také graf, ve kterém jsou vyneseny hodnoty v rámci jednoho měření, z nichž se dělal následně průměr do celkových výsledků. V tomto grafu je i v rámci odchylek možné vidět jistou rostoucí závislost na ploše (Obr. 10).

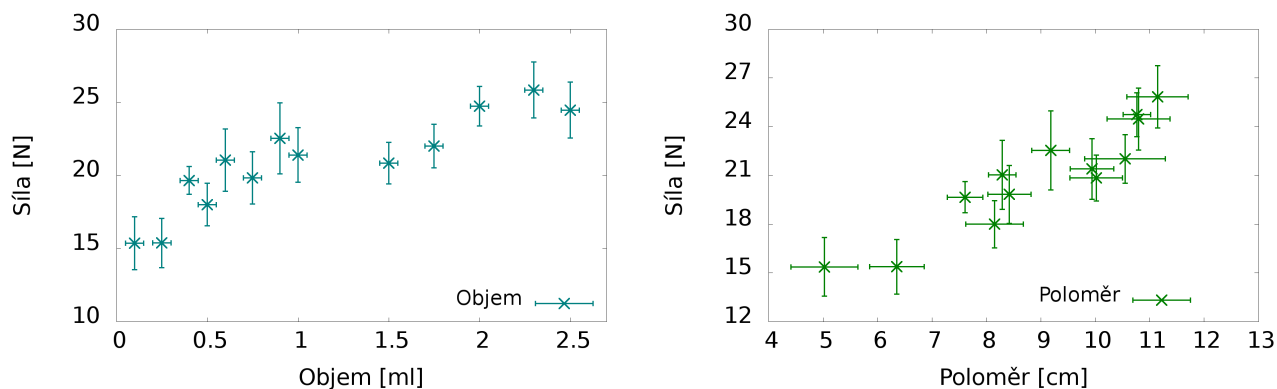
Z výsledků měření tedy plyne potvrzení rostoucí závislosti síly na ploše uvedené ve vztahu (1).



Obrázek 10: Graf závislosti síly potřebné k odtržení skel na ploše vody pod sklem pro konstantní objem $V = 0,75$ ml v rámci jednoho měření

5.2.1 Závislost síly na objemu a poloměru

Pro obraznost jsme se rozhodli také pro vytvoření závislosti síly na objemu použité kapaliny a poloměru (i přes odvození poloměru z již naměřených hodnot) vzniklého útvaru¹³.



(a) Graf závislosti síly na objemu použité kapaliny (b) Graf závislosti síly na poloměru vzniklého útvaru

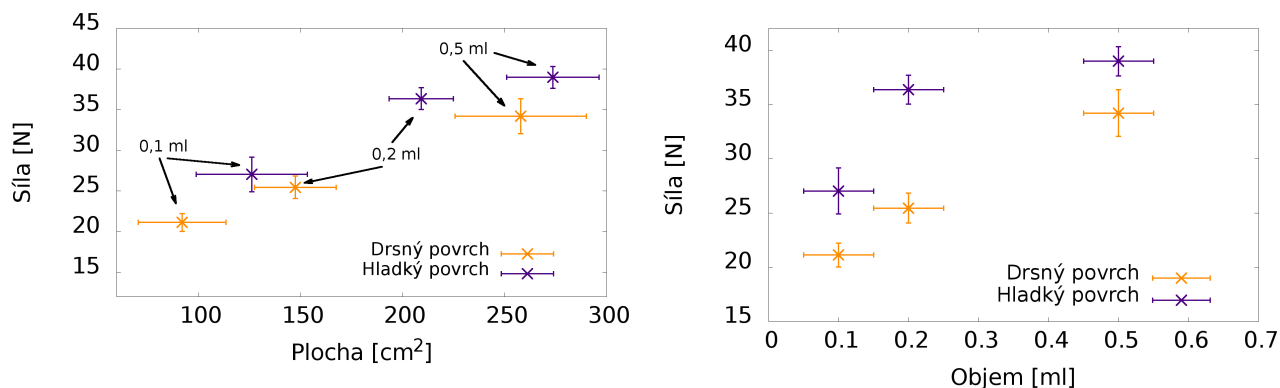
Obrázek 11: Porovnání grafů závislosti na objemu a poloměru

Jak pro objem tak i pro poloměr jsou závislosti rostoucí. Z grafů můžeme také vyčíst závislosti u objemu vzhledem k ploše podobné závislosti odmocniny, kdežto pro poloměr je to závislost připomínající druhou mocninu.

¹³Naměřené plochy objektu jsme zjednodušili na plochy tvaru kruhu a poloměr vypočítaly dle vzorce $r = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$. Vzniklá chyba tohoto výpočtu je zatížena chybou z manuálního získávání velikosti plochy v programu Inkscape

5.3 Závislost síly na drsnosti povrchu

V těchto experimentech jsme použili 3 odlišné objemy pro 2 povrchy skel lišící se pouze výrazným rozdílem drsnosti povrchu.



(a) Graf porovnání závislosti síly na ploše pro různé drsné povrchy (b) Graf závislosti síly na objemu pro různé povrchy

Obrázek 12: Porovnání vzniku různě velkých ploch pro stejné objemy na různých površích

Jak je z grafu vidět, plocha u drsného povrchu je výrazněji menší než u hladkého skla a to i přesto, že drsný povrch má menší povrchovou energii a je tedy kapalinou smáčen lépe, než povrch hladký. U drsného povrchu musí ovšem kapalina vyplnit všechny nerovnosti, a proto je ve výsledku plocha kapaliny pod sklem menší než u hladkého povrchu. Velkou roli zde hraje také větší zastoupení polární složky energie u „hladkého povrchu“ (viz Měření smáčivosti skel) ve vztahu k vodě jakožto polární kapalině. U „hladkého povrchu“ je tedy sice celková volná povrchová energie vyšší než u „drsného povrchu“, ovšem má větší polární složku a kontaktní úhel na „hladkém povrchu“ pro vodu je v důsledku tohoto výsledku menší, což má tedy pro výsledek tohoto experimentu podstatný vliv. Výpočet drsnosti ze vztahu (7) ukázal hodnotu drsnosti H u „drsného skla“¹⁴ pohybující se v rozmezí 3 - 4 μm , což tedy může být v rámci chyby zanedbatelný výsledek¹⁵.

5.4 Závislost síly na povrchovém napětí a jeho ovlivnění hypermanganem

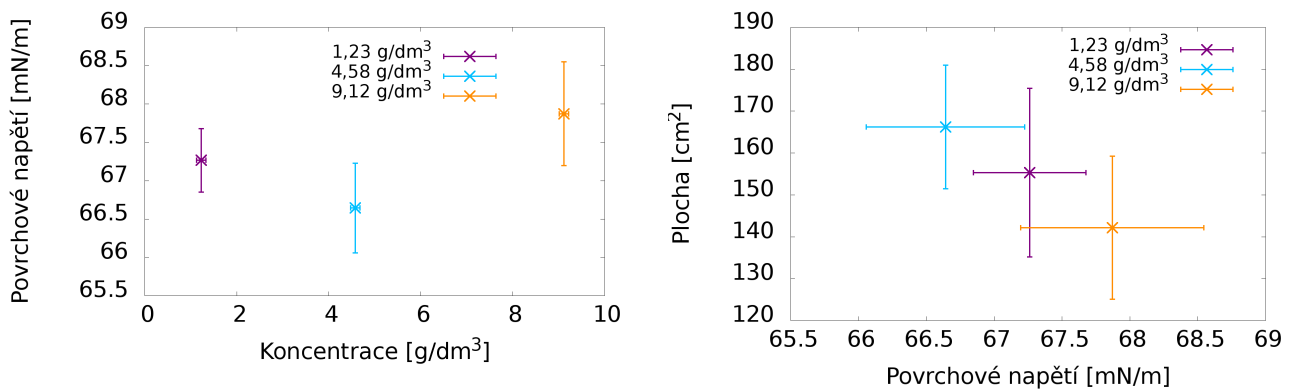
Tabulka výsledků měření povrchového napětí vzorků roztoku hypermanganu o různých koncentracích a škrobu vypočítané metodou odtrhávání kapek:

Kapalina	Koncentrace [g/dm ³]	Povrchové napětí [mN/m]
1. vzorek	(1,23 ± 0,1)	(67,26 ± 0,41)
2. vzorek	(4,58 ± 0,1)	(66,34 ± 0,98)
3. vzorek	(9,12 ± 0,1)	(67,87 ± 0,68)
škrob	-	(86,27 ± 3,12)

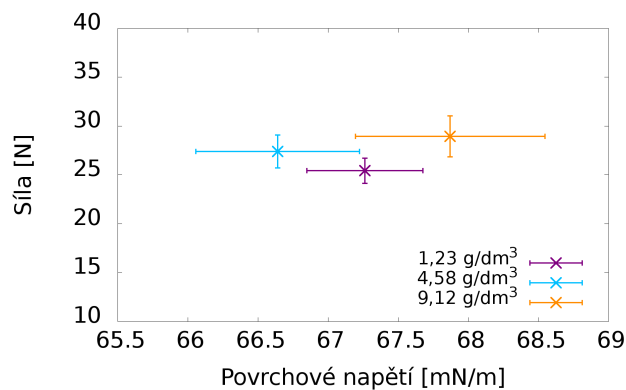
¹⁴Pro zjištění strukturálních nerovností jsme zkusili také optickou metodu zkoumání interferenčních obrazců, která se nakonec ukázala být neprůkazná. Strukturální nerovnosti jako takové by se z obecného hlediska vyskytovat neměly, byla používána speciálně kalibrovaná skla.

¹⁵Šířka d , respektive $d + H$, byla vypočítána díky známému objemu a změřené ploše: $d = \frac{V}{S}$.

Hodnoty povrchového napětí s hypermanganem se z celkového pohledu od povrchového napětí vody liší (72 mN/m), ale v rámci jednotlivých změn koncentrací je tento vliv vzhledem k chybám měření a k podobnosti jednotlivých hodnot zanedbatelný.



(a) Graf závislosti povrchového napětí na koncentraci (b) Graf závislosti plochy pod sklem na povrchovém manganistanu draselného napětí



(c) Graf závislosti síly na povrchovém napětí

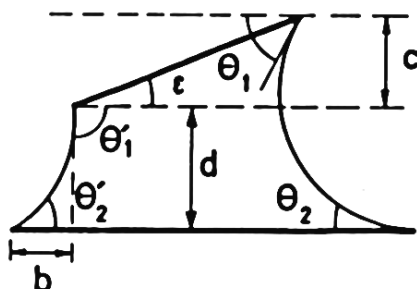
Obrázek 13: Vliv různých koncentrací manganistanu draselného na jednotlivé veličiny

Z výsledků tedy vyplývá vliv koncentrace manganistanu draselného na celkovou velikost síly potřebné k odtržení skel jako zanedbatelný. Ačkoliv vliv odlišné koncentrace manganistanu draselného na změnu povrchového napětí výrazný není, při použití kapaliny o výrazně odlišném povrchovém napětí by se tento parametr velice pravděpodobně ukázal jako podstatný. V zadání je ovšem zmíněna jako konkrétní kapalina voda, která má za normálních podmínek dané povrchové napětí. Z tohoto důvodu jsme případné další závislosti celkové síly potřebné k odtržení skel na povrchovém napětí použité kapaliny nezkoumali.

6 Diskuse

Měřicí metody byly navrženy tak, aby byly aplikovatelné na použitou teorii a případně bychom zní byli schopni získat potřebná data. Zároveň můžeme říci, že předpovědi vycházející z teorie potvrzují naměřené výsledky experimentů.

Jistou problematiku můžeme ovšem shledat ve způsobu odtrhávání skel a případnému naklonění skla při odtrhávání. Z geometrického zkoumání ovšem vyplynulo, že případná velikost úhlu odklonu při odtrhávání je poměrně nízká. Jednotlivé koeficienty b , d a c popisují geometrické uspořádání při šikmém odtrhování, kdy d je rovnoběžná vzdálenost dvou skel od sebe, c je výška od nejbližší rovnoběžné vzdálenostní přímkou k sešikmenému konci (ve výškovém směru) a b je posun skleněné desky v horizontálním směru.



Obrázek 14: Schéma odklonění skleněné desky při odtrhávání [3]

$$\begin{aligned} b &= R(\sin \theta_1' - \sin \theta_2') \\ d &= R(\cos \theta_1' + \cos \theta_2') \\ c &= R(\cos \theta_1 + \cos \theta_2 - \cos \theta_1' - \cos \theta_2') \end{aligned}$$

kde θ_1 a θ_2 jsou úhly neovlivněné odklonem desky a úhly θ_1' a θ_2' jsou ovlivněné [3]. Výsledná hodnota úhlu odklonu ϵ je tedy vzhledem k ostatním parametrům zanedbatelná.

Zároveň hrubost skla definovaná dle vztahu (7) je definována pro naše provizorní účely. Bližší a přesnější specifikace by byla možná právě dle definice ve vztahu (6), ovšem pro tu se nám nepodařilo z časových důvodů prozatím získat potřebné hodnoty.

U malých rozměrů skel, které jsme z našich experimentů vyřadili z důvodu špatně měřitelné celkové síly odtržení a také nutnosti malých objemů použité vody, by s největší pravděpodobností probíhaly stejné závislosti jako u námi použitých skel o velkých rozměrech. Z důvodu prokázání platnosti teorie pro skla větších rozměrů tedy vyvozujeme velký vliv plochy kapaliny pod sklem a mezipovrchového napětí i u skel malých.

Většina odchylek vznikla jako směrodatné odchylky od průměru. V ostatních případech se jednalo o chyby měřících přístrojů nebo odchylky měření vyplývající z hrubosti použité stupnice. Podstatná chyba může být také chyba vzniklá při analyzování obsahu a obvodu plochy pod sklem, která vychází z manuálního obkreslování a získávání tohoto typu dat. Dále také měření povrchového napětí roztoku hypermanganu je doprovázeno většími chybami měření, jelikož použitá měřicí metoda nebyla příliš přesná, ale poskytla nám potřebnou představu o vlivu koncentrace hypermanganu na povrchové napětí roztoku.

Jedním z dalších zajímavých směrů by mohlo být zkoumání vlivu povrchového napětí použité

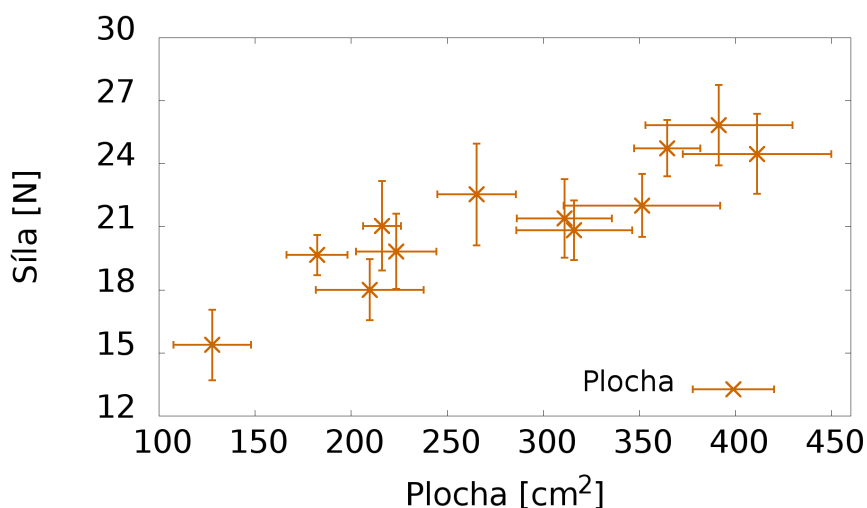
kapaliny na celkovou sílu potřebnou k odtržení skel. Tento parametr jsme podrobně experimentálně nezkoumali z důvodu zadání vody jakožto používané kapaliny v zadání úlohy.

7 Závěr

V rámci řešení úlohy Pulling Glasses Apart jsme se zaměřili na několik parametrů, které by mohly ovlivnit celkovou sílu potřebnou k odtržení skel od sebe. Skla jsme od sebe odtrhávali v kolmém směru, jelikož z našeho pohledu tento způsobem více odpovídal zadání, na rozdíl od podélného odtrhávání skel, které je bráno spíše jako posouvání, a také z důvodu praktického provádění experimentu. Všechny parametry vyplývají z teorie, která je založena na rozložení celkové síly na dvě složky - tlakovou sílu a sílu generovanou mezipovrchovým napětím. Jelikož jsme použili různé typy skel a měli možnost zjistit přilnavost vody k jejich povrchu, volnou povrchovou energii a její jednotlivé složky, popsali jsme celý problém i z tohoto termodynamického hlediska. Tedy jako soustavu o třech plochách s různými povrchovými napětími odpovídající mezipovrchovým napětím jednotlivých fází. Z důvodu toho, že povrch skla má velice výraznou polární složku a voda je polární kapalinou, umožnil nám tento popis molekulárních interakcí vysvětlení daného smáčení a velikosti kontaktních úhlů.

V rámci experimentů jsme provedli velké množství měření zaměřených na zkoumání závislosti síly na ploše vzniklého útvaru pod sklem a drsnosti povrchu. Ze vztahů uvedených v teoretické části se nám podařilo získat rozdíl tlaku (resp. podtlaku) generovaného mezi skly při odtrhávání. Zkoumali jsme také vliv obarvení vody manganistanem draselným, který jsme použili pro možnost vizuálního získání plochy útvaru, na hodnotu povrchového napětí roztoku a tedy i jeho vlivu na celkovou sílu nutnou pro odtržení skel.

Jako jeden z hlavních parametrů se ukázala právě plocha tvořená vodou pod sklem. Tato závislost byla patrná ze všech naměřených výsledků zaměřené původně i na jiné hodnoty.



Obrázek 15: Graf závislosti síly potřebné k odtržení skel na ploše vody pod sklem

Znovu uváděný graf na Obr. 15 je tedy naším hlavním výsledkem, jelikož se plocha tvořená kapalinou pod sklem před odtržením skel ukázala jako parametr s největším vlivem.

Drsnost povrchu skla měla také podstatný vliv, jelikož ovlivňovala právě obsah vzniklé plochy. Dalším parametrem je velikost povrchového napětí použité kapalina. Hodnota povrchového napětí za použití hypermanganu v porovnání s vodou příliš odlišná nebyla, ovšem při použití kapalin o výrazně jiných povrchových napětích se projeví i tato závislost. Hodnota povrchového napětí ovšem zároveň také ovlivňuje velikost vzniklé plochy, což nás tedy opět vede k tomuto parametru jakožto hlavnímu.

Ačkoliv na základě teorie neznáme přesný průběh jednotlivých závislostí pro možnost proložení dat křivkou, naměřená data vycházejí v souladu s použitou teorií. Teorii jsme následně využili hlavně při zkoumání vývoje tlaku při odtrhávání skel. Na druhou stranu je tato teorie aplikovatelná pouze pro kolmé odtrhávání skel od sebe a neřeší situaci, při které jsou skla odtrhávána podélně.

Reference

- [1] J. Novák a kolektiv. *Fyzikální chemie*. VŠCHT Praha, 2008.
- [2] E. A. Amelina E. D. Ščukin, A. V. Percov. *Koloidní chemie*. Academia, Praha, 1990.
- [3] M. A. Fortes. Capillary forces in liquid bridges and flotation. 23:193–204, 1981.
- [4] I. Krásný. Měření kontaktních úhlů smáčení a určování povrchové energie plastů. Master's thesis, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010.
- [5] M. Šišková L. Bartáková. *Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav*. VŠCHT Praha, 2005.