



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

**URČENÍ NESYMETRIE KONTAKTNÍHO ÚHLU U  
RŮZNĚ HYDROFOBNIÍCH POVRCHŮ**

IDENTIFICATION OF THE CONTACT ANGLE ANISOTROPY FOR HYDROPHOBIC SURFACES

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Mirek Simandl

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

doc. Ing. Simona Fialová, Ph.D.

BRNO 2017



## Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	<b>Mirek Simandl</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Simona Fialová, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Určení nesymetrie kontaktního úhlu u různě hydrofobních povrchů**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Hodnocení stupně hydrofobie povrchu pomocí měření kontaktního úhlu je základní metodou identifikace hydrofobních vlastností. V závislosti na typu povrchu a způsobu dosažení hydrofobie (výrobě hydrofobní vrstvy) se ale kontaktní úhel mění. Práce by měla být řešerší prací na téma anisotropie kontaktního úhlu a zároveň provedeným a vyhodnoceným vlastním experimentem v laboratoři OFIVK.

#### **Cíle bakalářské práce:**

Provést hlubší literární řešerší řešené problematiky. Následovat bude experimentální část – měření kontaktních úhlů hydrofilních materiálů a více typů hydrofobních materiálů vzniklých různými povrchovými úpravami. Výsledkem bude zhodnocení vlivu technologie výroby na nesymetrii kontaktního úhlu vody na daných materiálech.

#### **Seznam doporučené literatury:**

Korenc R.: Měření povrchového napětí na zařízení SEE SYSTEM, Bakalářská práce, Univerzita Pardubice, Fakulta Chemicko-technologická, 2013

SEE SYSTEM manual, <http://www.advex-instruments.cz/>

Nováková N.: Určení kontaktního úhlu kapalin pro povrchy ošetřené

Ultra Ever Dry, Výzkumná zpráva, VUT 2014

Svoboda, J. Studie vlivu povrchové energie různých druhů kapalin a povrchů - experiment, Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne 8. 11. 2016



doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt**

Bakalářská práce vysvětluje princip chování vodních kapek při kontaktu s hydrofobními až super-hydrofobními povrchy s kontaktním úhlem přesahujícím 150°. Byl zkoumán vliv směru textury (povlakovaná jednosměrná, povlakovaná vzájemně kolmá, nepovlakovaná a s nedefinovaným směrem) na anisotropii kontaktního úhlu povrchu pomocí softwaru SEE System a jeho měřicího příslušenství. Na každém vzorku proběhlo měření s velikostí kapek vody 3μl, 5μl a 10μl. Dále byl pozorován vliv struktury na odtržení kapky při náklonu vzorku. Jsou vyhodnoceny jak jednotlivé vzorky, tak skupiny se stejným směrem struktury. Z těchto výsledků jsou vyvozeny některé obecné závěry související s vlivem směru struktury a velikostí kapky na anisotropii kontaktního úhlu.

## **Klíčová slova**

Kontaktní úhel, anisotropie kontaktního úhlu, struktura superhydrofobního povrchu, experiment

## **Abstract**

Bachelor thesis deals with the principle of solid/liquid interface. A water droplets behaviour is observed in contact with hydrophobic and superhydrophobic surfaces (contact angle exceeding 150°). The influence of the coating direction (unidirectional coating, perpendicular coating, both directions, uncoated and undefined) of the surface was evaluated. The contact angle anisotropy was examined using the SEE System software and its measuring accessories. Each sample was measured with three volumes of water droplet - 3μl, 5 μl and 10 μl. Further, the influence of the structure on the droplet motion on an inclined plane was observed. Individual samples and groups with the same direction of the coating structure are evaluated. From these results are taken some general conclusions regarding to the influence of the direction of the structure and the droplet size on the contact angle anisotropy.

## **Key words**

Contact angle, contact angle anisotropy, superhydrophobic surface structure, experiment



## **Prohlášení o originalitě**

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 22. 05. 2017

.....

podpis

## **Bibliografická citace mé práce:**

SIMANDL, M. *Určení nesymetrie kontaktního úhlu u různě hydrofobních povrchů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. XY s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Simona Fialová, Ph.D.





## **Poděkování**

Děkuji doc. Ing. Simoně Fialové, Ph.D. za odbornou a technickou pomoc, za cenné rady a připomínky týkající se realizace a zpracování bakalářské práce.

# Obsah

Úvod .....	13
2 Základní teorie .....	14
2.1 Hystereze kontaktního úhlu .....	15
2.2 Struktura hydrofobních povrchů a její vliv na kapku vody .....	17
2.2.1 Kontaktní úhel hydrofobních struktur.....	18
2.2.2 Vliv hydrofilní anizotropní struktury na chování kapky .....	19
3 Experimentální část.....	21
3.1 Povolování vzorků .....	21
3.2 Aplikace a velikost kapek vody .....	21
3.3 Určení anisotropie kontaktního úhlu kapky vody .....	23
3.3.1 SEE System .....	23
3.4 Určení rozdílných úhlů odtržení kapky vody .....	24
3.4.1 Metoda a postup měření .....	24
4 Výsledky a hodnocení měření.....	26
4.1 Vyhodnocení jednotlivých vzorků .....	26
4.1.1 Letecký plech bílý s neurčeným směrem struktury .....	27
4.1.2 Letecký plech zelený s neurčeným směrem struktury.....	28
4.1.3 Letecký plech černý s neurčeným směrem struktury .....	29
4.1.4 Plech bez povrchové úpravy .....	30
4.1.5 Plech s příčným směrem struktury.....	31
4.1.6 Plech s podélným směrem struktury .....	32
4.1.7 Plech s příčným i podélným směrem struktury .....	33
4.1.8 Plast bez povrchové úpravy .....	34
4.1.9 Plast s příčným směrem struktury .....	35

4.1.10	Plast s podélným směrem struktury .....	36
4.1.11	Plast s příčným i podélným směrem struktury .....	37
4.2	Souhrnné vyhodnocení výsledků .....	38
4.2.1	Průměrná nesymetrie kontaktních úhlů jednotlivých povrchů .....	39
4.2.2	Průměrná nesymetrie kontaktních úhlů plechů .....	40
4.2.3	Průměrná nesymetrie kontaktních úhlů plastů .....	41
	Závěr .....	42
	Seznam použité literatury .....	44
	Seznam použitých symbolů a zkratk .....	46
	Seznam obrázků .....	47
	Seznam tabulek .....	48
	Seznam grafů .....	49
	Seznam příloh .....	50



## Úvod

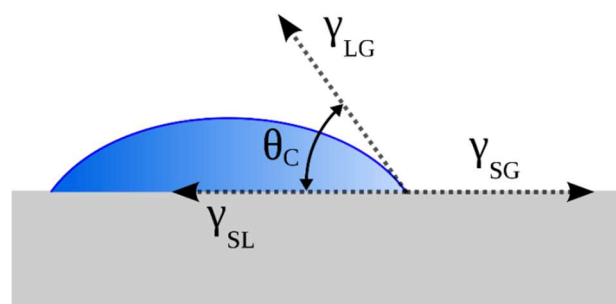
Existují materiály s povrchy, na nichž má kapka vody téměř dokonalý tvar koule. Staly se předmětem výzkumu mnoha vědců z pohledu jejich vlastností, výroby, ale především praktického využití. Jedná se o hydrofobní materiály. Inspirací je opět příroda, která tyto povrchy dokáže po generace vytvořit sama. Například dokonale uspořádaná struktura motýlích křídel zajišťuje, že motýli mají křídla stále suchá a mohou létat. Bruslařka obecná (*Gerris lacustris*) bez problémů klouže po vodní hladině, což jí umožňuje povrchové napětí mezi vodou a nohama, ale pokud bychom ji postavili na hladinu oleje, tak se utopí. Byl pozorován samočistící efekt lotosu, při němž kapky stékají po listech a smývají nečistoty. Zajímavé je, že struktura lotosového listu se mění podle toho, zda je v kontaktu se vzduchem, nebo se nachází pod vodní hladinou, kde vykazuje superoleofobní vlastnosti. Podobné vlastnosti mají ryby a žraloci, díky nim jsou stále v bezpečí, i když dojde k ropným haváriím [9].

Studium, znalost a výzkum této problematiky otevírá nové možnosti. Každodenní využití těchto vlastností vede k větší efektivitě, redukci nákladů a ušetření energie. Například velký boom zaznamenává nano ochrana. Princip spočívá v nanosení povlaku na materiál a tím vytvoření hydrofobní vrstvy čili „efekt lotosového květu“. Například po takto naimpregnovaném čelním skle automobilu zůstanou na skle pouze kapky, které snadno stečou, a nedojde ke vzniku jednolitého filmu [5]. Křídla letadel jsou ošetřena tak, aby na nich neulpívala námraza [8]. Další aplikace jsou také v mikrofluidice, u různých antikoročních nátěrů, v optických zařízeních, v tiskové technice, využívají se k zamezení přenosu tepla [9]. Naopak hydrofilní povrchy jsou nezbytné pro lepení nebo pájení materiálů.

Super-hydrofobní povrchy lze vyrobit zdrsněním a nanosením povlaku, leptáním nebo mikroobráběním [2]. Vznikne povrch, který není dokonale hladký. I když u super-hydrofobních povrchů dosahuje kapka téměř koule, mohou se její kontaktní úhly lišit v závislosti na jeho struktuře. Při pohledu shora kolmo na materiál je pozorována deformace koule do oválného tvaru ve směru struktury [7].

## 2 Základní teorie

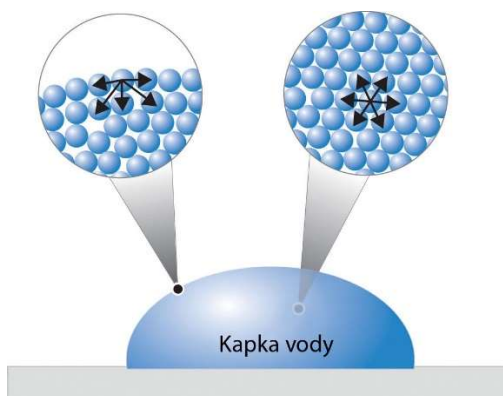
Jedna ze základních vlastností materiálu z pohledu hydromechaniky je kontaktní úhel. Jedná se o úhel, který svírá rozhraní kapaliny a pevné vodorovné látky s rozhraním kapaliny a páry (zpravidla vzduch). Do  $90^\circ$  je definován jako hydrofilní povrch a nad  $90^\circ$  jako hydrofobní. Při dosažení kontaktních úhlů větších než  $150^\circ$  je označován jako superhydrofobní povrch, zde nemá kapka skoro žádný kontakt s povrchem a má téměř tvar koule.



*Obrázek 1- Kontaktní úhel*

Tato vlastnost je závislá na povrchovém napětí. Molekuly v kapalině působí vzájemně na sousední molekuly stejně velkou silou, která se vyruší. Na rozhraních kapaliny nejsou další molekuly, a proto není výslednice sil nulová. Pak jsou tyto molekuly více vtahovány do středu kapaliny než do vzduchu. Na povrchu vzniká tlak, což způsobuje, že povrch připomíná tenkou napjatou blánu.

Každý prvek v přírodě se snaží mít co nejmenší volnou energii. Důsledkem je, že se kapky snaží mít co nejmenší povrch vzhledem k objemu, a tak se co nejvíce přiblíží tvaru koule. Nejlépe tento jev můžeme vidět na snímcích z vesmírných stanic, kde jsou zanedbatelné vnější síly. Na Zemi kapka není dokonalá koule, dochází k deformaci, kterou při normálních podmínkách způsobuje zejména gravitace.



**Obrázek 3-** Povrchové napětí



**Obrázek 2-** Kapka vody ve vesmírné stanici

Z obecného hlediska velikost kontaktního úhlu závisí na povrchovém napětí a působení vnějších sil. Tuto skutečnost popsal Thomas Young v roce 1805 jako mechanickou rovnováhu kapky vzniklou působením tří mezifázových napětí plyn - kapalina  $\gamma_{lg}$ , kapalina - pevná látka  $\gamma_{sl}$  a plyn - pevná látka  $\gamma_{sg}$ , pak je Youngova rovnice definována [1], [2], [3] a [5]:

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

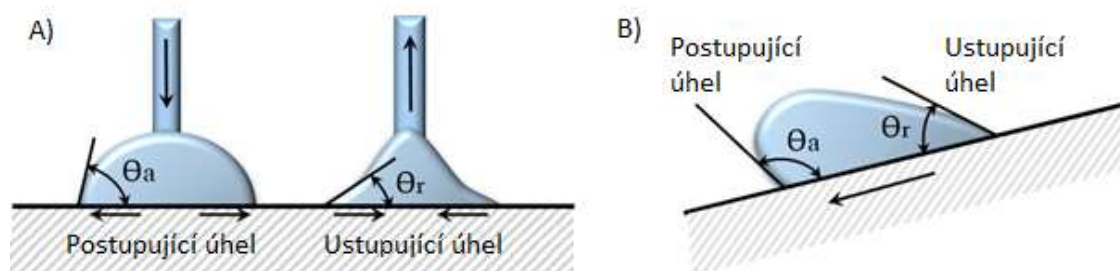
## 2.1 Hystereze kontaktního úhlu

Pokud známe parametry Youngovy rovnice, lze pro konkrétní systém stanovit relativně přesný kontaktní úhel. Rovnice je použitelná pro statické výpočty na vodorovném podkladu a uvažuje izotropní povrch. Pokud dojde k náklonu vzorku nebo pohybu kapky po povrchu, dochází k rozdílu kontaktních úhlů. Jedná se o hysterezní nebo také dynamický kontaktní úhel (H). Jde o rozdíl mezi postupujícím  $\Theta_a$  a ustupujícím  $\Theta_r$  kontaktním úhlem. Zpravidla pro pohybující se kapku platí, že  $\Theta_a$  je větší než  $\Theta_r$ . Při chemických reakcích kapaliny s povrchem materiálu dochází ke změně úhlu v čase [3].

$$H = \theta_a - \theta_r \quad (2)$$

Postupující úhel leží v místě, na němž se kapka posune v případě překonání energetické bariéry, a nabývá maxima kontaktního úhlu kapky. Naopak ustupující úhel se nachází na opačné straně a dosahuje minima. Dynamické měření lze provádět při různých rychlostech, zpravidla by se kontaktní úhly při nízkých rychlostech měly velikostně přibližovat statickým.

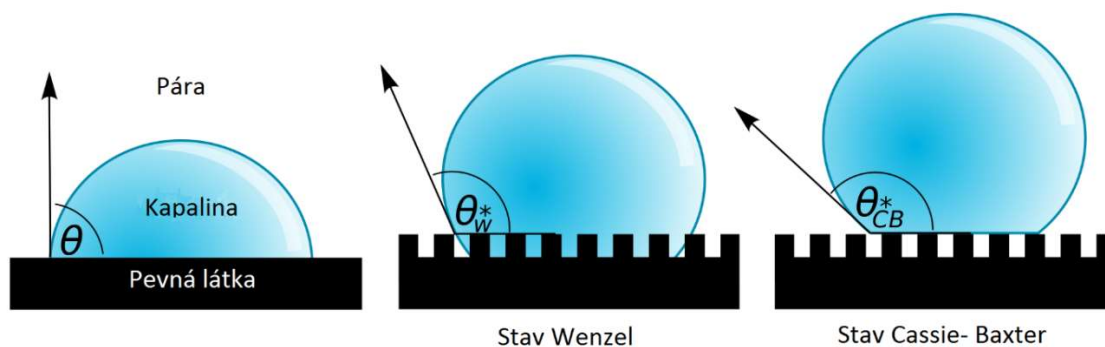
Obecným závěrem je, že hystereze vyplývá z drsnosti a heterogenity povrchu. Nehomogenní plochy představují energetickou bariéru pro pohyb. Vypadá to, jako kdyby část kapaliny, jež je v kontaktu s povrchem, byla přichycena a její zbytek se na ni snažil navalit a přetéct. Pak při postupu kapky pozorujeme zvýšení kontaktního úhlu. Na druhé straně vidíme přichycení, ale s opačným efektem, kdy chce kapalina odtéct, ale nemůže. Při ústupu kapky se úhel zmenšuje (obr. 4).



**Obrázek 4-** Metody měření hystereze kontaktního úhlu a) objemová metoda b) metoda nakloněné roviny (upraveno [15])

Při zkoumání kontaktních úhlů na pevných látkách bylo experimentálně zjištěno, že na ideálním povrchu nedochází k hysterezi a shoduje se s Youngovým kontaktním úhlem. U hladkého, avšak heterogenního povrchu lze postupující úhel považovat za dostačující aproximaci, ale ustupující úhel neodpovídá Youngovu. Na hrubém povrchu nedochází k žádné shodě. Pro výpočty hrubých a heterogenních povrchů se vychází z modelů Wenzel a Cassie-Baxter. Není však obecně zjištěno, při jaké drsnosti nedojde k ovlivnění kontaktního úhlu [4].

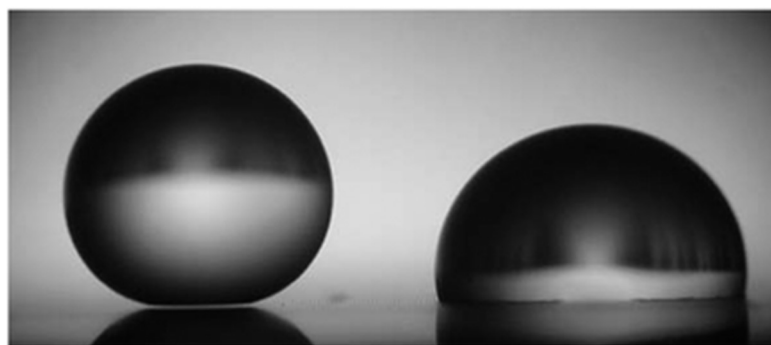




**Obrázek 5-** Modely kontaktu kapky s hladkým a drsným povrchem

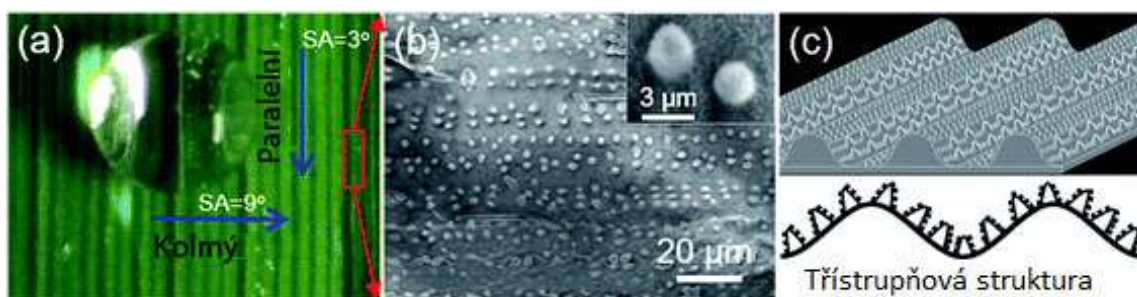
## 2.2 Struktura hydrofobních povrchů a její vliv na kapku vody

Zdá se, že kapka leží na hladkém povrchu, avšak při detailním pohledu je zřejmé, že povrch má strukturu a ta je zásadní pro hydrofobitu povrchu. Také je nezbytné vysoké povrchové napětí vody, při němž se kapka dotýká pouze vrcholků struktury a nevytláčí vzduchový polštář, na kterém leží, což je stav Cassie-Baxter (obr. 5). Pokud dojde k překonání energetické bariéry, tedy k vytlačení vzduchového polštáře, a prostor se zaplní vodou, zmenší se kontaktní úhel a přejde do stavu Wenzel (obr. 5) [12].



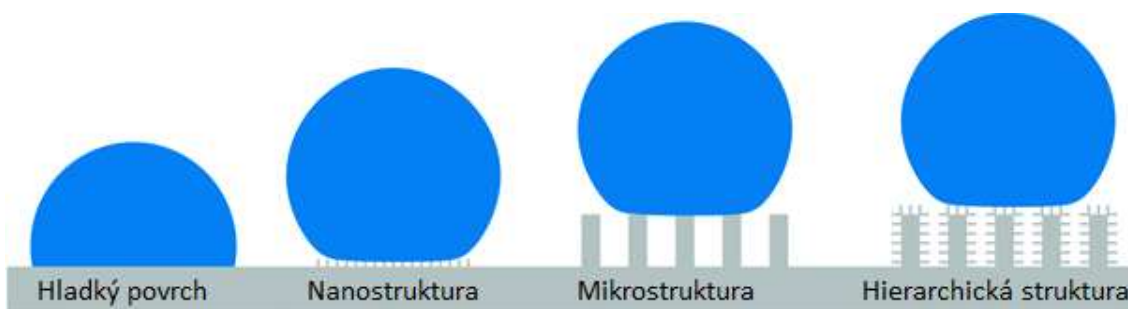
**Obrázek 6-** Kapka ve stavu Cassie- Baxter vlevo přejde do stavu Wenzel vpravo [12]

V přírodě jsou běžné hierarchické struktury. Jedná se o kombinaci mikro a nano struktur, jež jsou uspořádány nad sebou. Příkladem může být list rýže se třístupňovou uspořádanou strukturou. U lotosového listu bylo zjištěno, že papily jsou náhodně umístěny na povrchu, ale vzhledem k hierarchické struktuře papil je list výborně nesmáčivý [12].



**Obrázek 7-** Superhydrofobní list rýže a) rýžový list s kapkou vody b) struktura rýžového listu c) schéma hierarchické struktury rýžového listu (upraveno z [13])

Místo takto komplikovaných povrchů je pro výrobu snadnější nahradit je zjednodušenou nehierarchickou mikro nebo nano strukturou tvarově připomínající jehličky, žárovky nebo pilíře v kombinaci s povlakem fluorovaných polymerů nebo uhlovodíků mající nízkou povrchovou energii. I když vykazují dobré hydrofobní vlastnosti, je jejich použití omezené. Jsou stavěné pro vysoké povrchové napětí vody, takže nemusí fungovat pro kapaliny s nižším povrchovým napětím, například pro olej. Kvůli ztrátě odpuzování, kdy je kinetická energie padající kapky větší než povrchu, je nelze použít pro venkovní nátěry nebo ponořit do větší hloubky. Struktury jsou velmi křehké, což vede k jejich rychlému zbourání a ke ztrátě vlastností [12].

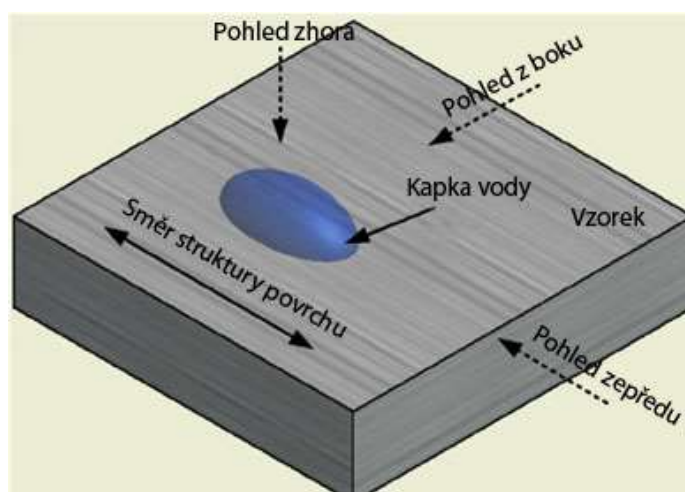


**Obrázek 8-** Typy kontaktu kapky vody s různými strukturami povrchů (upraveno [12])

### 2.2.1 Kontaktní úhel hydrofobních struktur

Smáčivost je zpravidla charakterizována pro kontaktní úhel vody a pevného povrchu. Na izotropním povrchu se voda snaží dosáhnout energetického minima. Kapičky mají tendenci zůstat v kulovém tvaru, jelikož energetické bariéry jsou ve všech směrech stejné, úhel je tedy konstantní. Prakticky nelze dosáhnout dokonalého izotropního povrchu v technických aplikacích, úhly však budou velmi podobné.

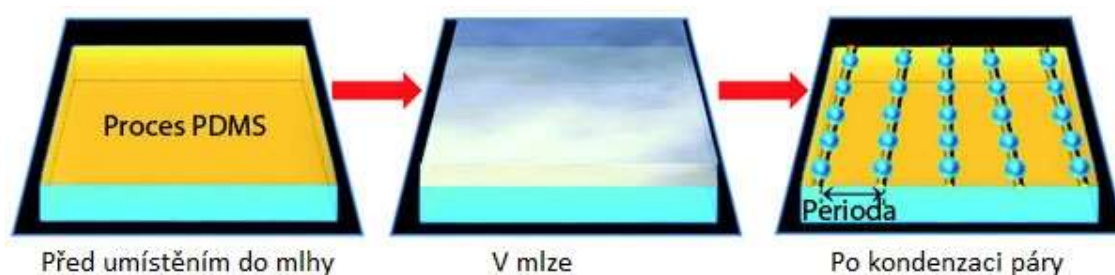
Vhodnou texturou povrchu lze ovlivnit pohyb i tvar kapky na povrchu. Anizotropní struktura má tvar drážek umístěných vedle sebe. Na jejich směr je závislý kontaktní úhel. Ve směru kanálků nemá kapka zdaleka tak velkou energetickou bariéru, jakou má v kolmém směru, a tak má tendenci se tímto směrem roztahovat. Naopak v kolmém směru je překonání energetické bariéry v podobě drážek náročné, kapka se pouze na drážku naválí, ale nepřekoná ji. Výsledný tvar kapky tvoří elipsoid, úhel v paralelním směru je menší než v kolmém. Rozdíl mezi těmito úhly charakterizuje anizotropii smáčení povrchu. Její velikost závisí především na přesnosti uspořádání, drsnosti a heterogenitě struktury. Se zvětšujícími se kanálky při stejném tvaru a hladkosti textury dochází k lineárnímu nárůstu anizotropie [10] a [11].



**Obrázek 9-** Chování vodní kapky na strukturovaném povrchu (upraveno [17])

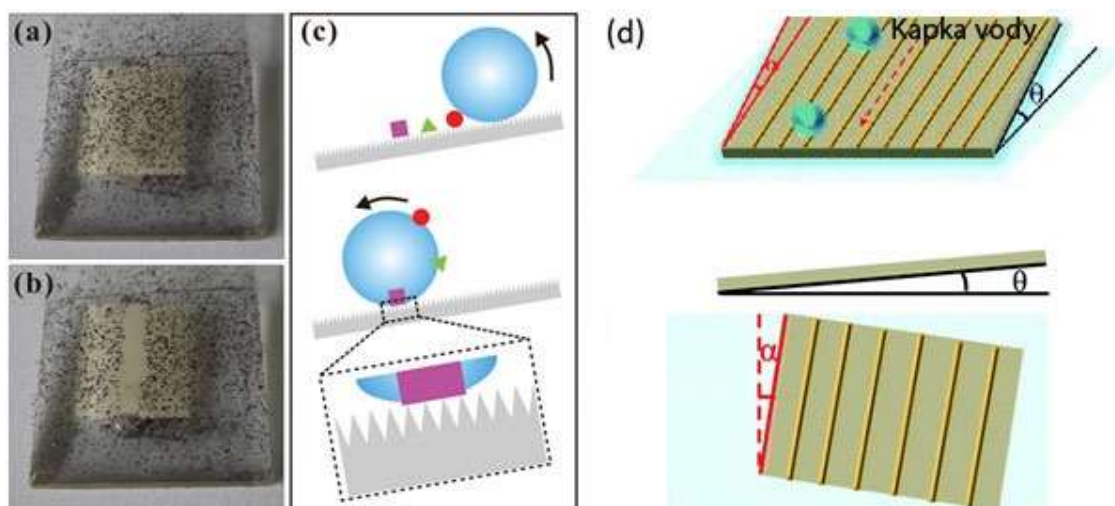
### 2.2.2 Vliv hydrofilní anizotropní struktury na chování kapky

Výzkum povrchu rostlin a živočichů ukázal, že některé struktury jsou nejen hydrofobní, dokonce jejich textura dokáže vodu přemístit přesně tam, kam chtějí. Rostliny jsou schopny vodu zachytit na listech, dopravit ke kořenům a zároveň smýt z listů nečistoty. To je možné vlivem textury, která má tvar drážek, jež jsou paralelně umístěny vedle sebe. Kapky vody vzniklé na povrchu po kondenzaci páry mají přibližně stejnou velikost a jsou umístěny za sebou podle drážek v textuře. Na izotropním povrchu dosahují velikostních rozdílů v náhodných rozpoloženích.



**Obrázek 10-** Proces ulpívání mlhy na hydrofobním povrchu (upraveno z [13])

Umístí-li se kapky na povrch, nastane stejná situace, jako bychom postavili vlak na koleje. Nejprve dojde k jevu popsaného v kapitole 2. 2. 1. Při následném naklonění vzorku překoná voda energetickou bariéru a začne se pohybovat ve směru drážek, jako když vlak jede po kolejkách. Při umístění kapky na anizotropní povrch, jež je nakloněn a následně natočen kolem vlastní osy, dojde ke sklouznutí kapky po vychýlené struktuře. Při umístění kapky na izotropní povrch kapalina sklouzne přímo [13]. Při pohybu se kapka naválí, jelikož super-hydrofobní povrchy mají malou hysterzi kontaktního úhlu. Během tohoto pohybu do sebe kapka natchytá nečistoty, které odnese s sebou. Po povrchu s větší hysterzi kapka pouze klouže a není schopna do sebe vstřebat tolik nečistot [14].



**Obrázek 11-** a) Vzorek s nečistotami b) Sesbírání nečistot ze vzorku c) Princip zachycení nečistoty do kapky d) Stékání kapky po vychýlené struktuře (upraveno [13] a [16])

## 3 Experimentální část

Chování kapky vody ležící na hydrofobním povrchu materiálu je dáno jeho strukturou. Jednou z možností jak dokázat toto ovlivnění je zjištění nesymetrie kontaktního úhlu nebo úhlu odtržení. Pro experiment bylo použito 11 vzorků s kontaktními úhly 80 - 155°, které lze rozdělit do pěti skupin:

- Letecké plechy (80°- 105°)
- Polypropylen bez povlaku (75°-90°)
- Polypropylen s povlakem (140°-155°)
- Nerezový plech bez povlaku (75°-90°)
- Nerezové plechy s povlakem (140°-155°)

### 3.1 Powlakování vzorků

Na první pohled je vidět rozdíl velikostí kontaktních úhlů mezi povlakovanými a nepovlakovanými povrchy. V tomto případě byl použit povlak Ultra Ever Dry, který je komerčně dostupný a vytváří hydrofobní povrch na materiálu. Nanášení probíhalo vždy v předem daném směru kvůli pozdějšímu pozorování a vyhodnocení vlivu textury na asymetrii kontaktního úhlu a úhlu odtržení. Směr struktury je podélný, příčný a kombinovaný, tedy podélný i příčný.

Povlaky jsou skvělé v ohledu hydrofobity, ale jsou nesmírně náchylné k poškození. Pouhý dotek prstu stačí ke zbourání nano struktur, které si lze jednoduše představit jako kuželky, do nichž byla právě hozena bowlingová koule. V tomto místě přichází okamžitá ztráta vlastností a kapka vody se k němu přichytne, oproti nepoškozenému, kdy se přes něj lehce převalí. Opatrná manipulace je tedy namístě.

### 3.2 Aplikace a velikost kapek vody

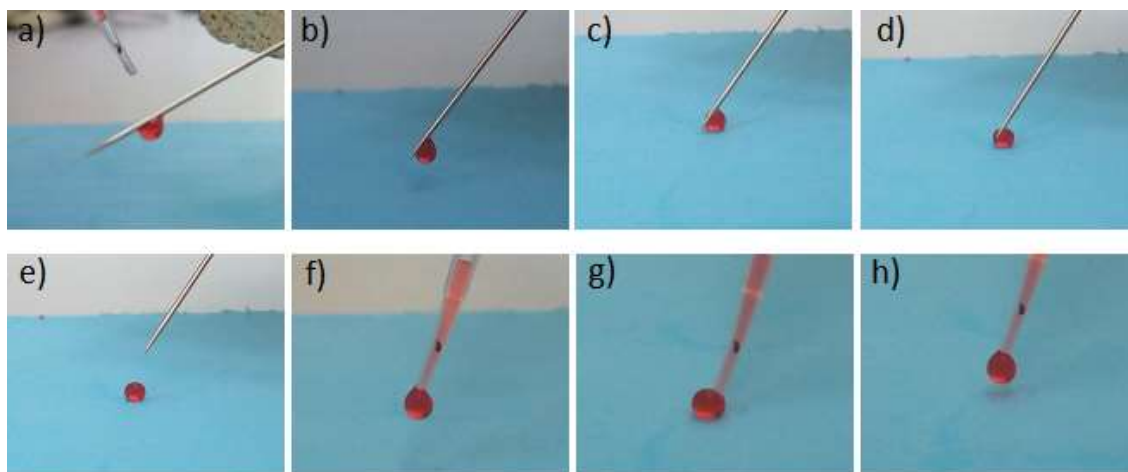
Vnější síly (zejména gravitace) působící na kapku ovlivňují velikost kontaktního úhlu. S rostoucí velikostí kapky roste její ovlivnění a také dochází ke snadnějšímu prolomení energetické bariéry. Použita byla pipeta s rozsahem 0,5-10  $\mu$ l. Pro měření byla nejmenší kapka zvolena z důvodu manipulace velikost 3  $\mu$ l, dále také velikost 5  $\mu$ l a pro porovnání

vlivu velikosti také 10  $\mu\text{l}$ . Voda byla obarvena potravinářským barvivem, aby bylo lépe vidět rozhraní mezi kapkou a povrchem.

Materiály s menším kontaktním úhlem při aplikaci kapky na povrch přilnou z pipety k povrchu a zůstanou na místě (letecké plechy a nepovlakované vzorky). Naopak proces aplikace kapek na superhydrofobní materiály je specifický. Hydrofobní povrchy odpuzují vodu, mají nízkou povrchovou energii. Kapka nechce opustit hrot pipety a přilnout k povrchu z důvodu menší energie mezi kapkou a povrchem než mezi kapkou a hrotem pipety, což pozorujeme na obrázku 12f až 12h, kdy kapka po kontaktu s povrchem stále drží na pipetě.

Proto byl pro umístění kapky na povrch použit mezikrok s jehlou (obr. 12a). Mezi kapkou a jehlou je menší energie, přesto je dost velká na to, aby se jehly stále držela. Při mírném kmitavém pohybu jehly kapka sjede po jehle na vzorek, ale je velmi nestabilní. Těmto povrchům stačí i minimální náklon ( $3^\circ$ - $5^\circ$ ) a kapka z nich z klidové pozice sjede, natož když kapka na povrch sjíždí z jehly s určitou kinetickou energií, takže se při dopadu neřízeně pohybuje po povrchu. Proto je nezbytné, aby byl vzorek ve vodorovné pozici, a i tak je nutné kapku nejdříve přidržet na místě a až poté jehlu pomalu odstranit.

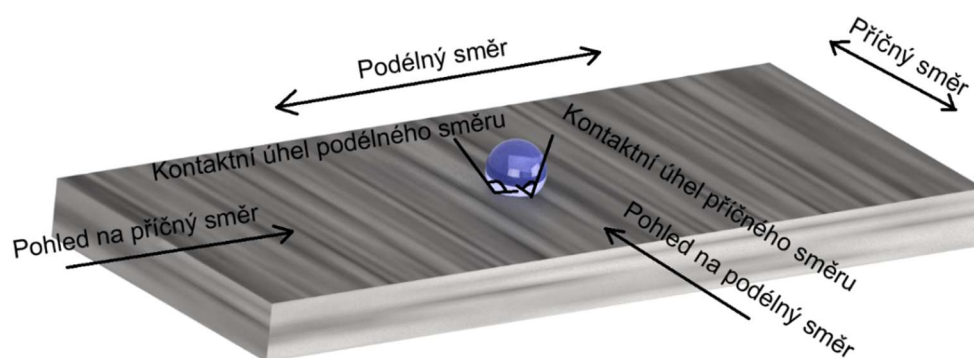
Výhodou je, že lze kapkami kontrolovatelně pohybovat po povrchu, ale pouze při kontaktu se špičkou jehly. Pokud dojde ke kontaktu větší plochou jehly s kapkou, kapka ulpí na jehle a celý proces aplikace může začít od začátku. (obr. 12b-12e).



**Obrázek 12-** Aplikace kapek vody na superhydrofobní povrch a-e) pomocí jehly f-h) pomocí pipety

### 3.3 Určení anisotropie kontaktního úhlu kapky vody

Anisotropie kontaktního úhlu hydrofobního povrchu vypovídá o vlivu struktury na chování kapky vody. U nanosených povlaků je znám směr struktury. Pro určení nesymetrie u známých směrů struktury je nutné změřit vždy kontaktní úhly na sebe vzájemně kolmé a následně je od sebe odečíst. Ve směru struktury je kontaktní úhel menší, naopak kolmo na její směr je větší. Na určení jejího směru je třeba měřit ve více směrech a podle velikostí úhlů směr přibližně určit. Jako vhodná metoda byla zvolena metoda sedící kapky, byla naměřena pomocí softwaru SEE systém a jeho měřicího příslušenství. Označení a popis měření vychází z obrázku 13.



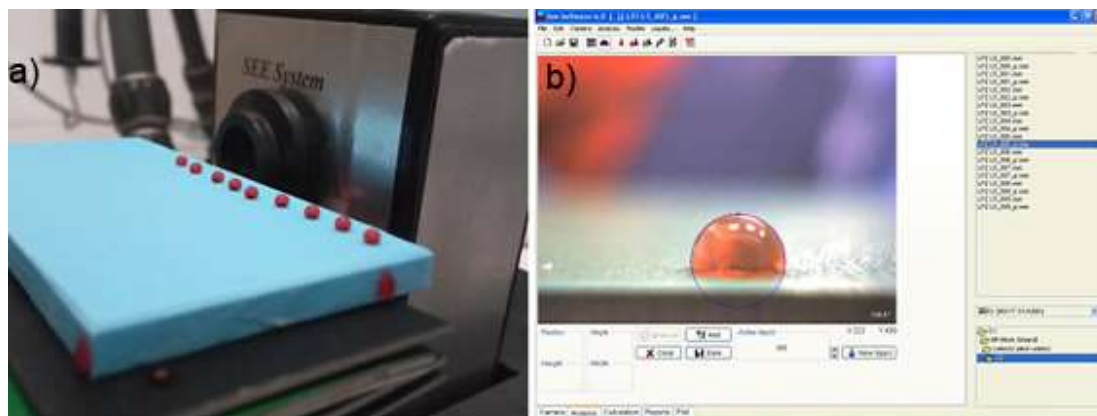
*Obrázek 13- Model směrů a kontaktních úhlů použitých při popisu a měření*

#### 3.3.1 SEE System

Surface Energy Evaluation System (systém vyhodnocení povrchové energie) zkráceně SEE System byl vytvořen na Přírodovědecké fakultě Masarykovy univerzity. Využívá nepřímé metody měření povrchové energie pomocí naměřeného kontaktního úhlu ležící kapky kapaliny na pevném povrchu.

Skládá se z CCD kamery a SEE softwaru. Kamera je umístěna ve vertikálně posuvném stojanu, před ní se nachází posuvný systém, který umožňuje pohybovat vzorkem tak, aby mohla být pořízena ostrá fotografie kapky. Software je propojen s kamerou, ze které se do něj přenáší obraz. Po aplikaci kapky kapaliny pomocí mikropipety a zaostření je pořízen snímek. Na základě aproximace, kdy jsou určeny tři body nebo více bodů, je

profil kapky převeden na kružnici a následně stanoven kontaktní úhel (obr. 14). Na jeho základě lze také vypočítat povrchovou energii pomocí několika modelů a porovnat výsledky se standardy. Další možností je sledovat a zachycovat profil kapky v časovém horizontu. Pomocí SEE Systemu dochází ke zpřesnění měření z důvodu zmírnění subjektivní chyby při ručním způsobu měření [3] a [18].



**Obrázek 14** - Měření kontaktního úhlu pomocí SEE System a) Pořizování snímku kapky umístěné na vzorku CCD kamerou b) Vyhodnocení kontaktního úhlu dané kapky v softwaru SEE Software

### 3.4 Určení rozdílných úhlů odtržení kapky vody

Superhydrofobním povrchům stačí náklon několika stupňů na to, aby se kapka vody utrhl a začala se po nich valit. Ve směru struktury by měl stačit menší úhel náklonu vzorku pro odtržení kapky, jelikož v kolmém směru na strukturu je potřeba překonat větší energetickou bariéru. Měření bylo provedeno přímou metodou pomocí jednoduchého měřicího zařízení.

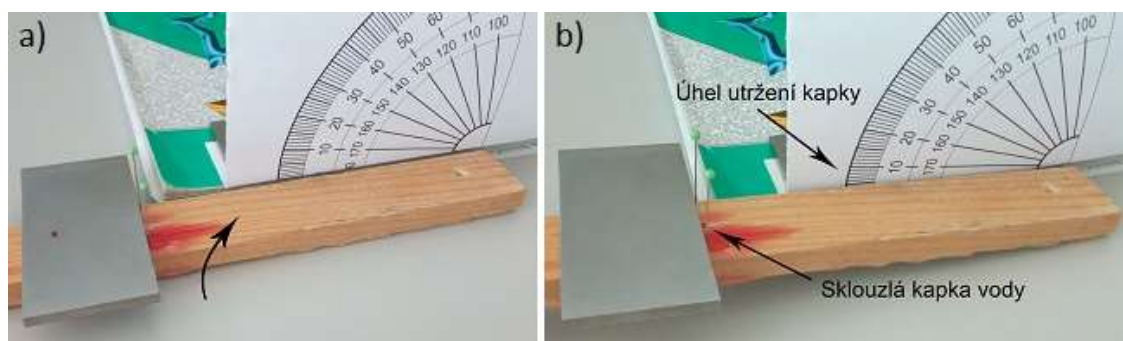
#### 3.4.1 Metoda a postup měření

Metoda spočívá v aplikaci kapky na vzorek ve vodorovné pozici (obr. 15a) a poté vzorek naklánět tak dlouho, dokud se kapka nezačne valit. V momentě odtržení kapky je odečtena velikost úhlu z úhломěru (obr. 15b). Byla použita kapka velikosti 3  $\mu\text{l}$ , u některých vzorků také 10  $\mu\text{l}$  pro ověření, že se kapka opravdu neutrhne. Měření byla provedena pro příčný i podélný směr vzorku, byla porovnána se směry struktury a vypočítána nesymetrie.



Nejprve byla snaha o přímý náklon vzorku, avšak tento postup byl velice nepřesný. Během měření docházelo k nevýraznému kmitání ruky, což se na malé délce vzorku, zejména na kratší straně, projevovalo velkými nepřesnostmi. Na základě těchto poznatků bylo provedeno zdokonalení celého měření pomocí dřevěné laťky, čímž bylo získáno dostatečné dlouhé rameno pro to, aby se eliminovaly negativní vlivy při náklonu vzorku a bylo dosaženo přesnějšího odečítání hodnot. Vzorek byl zachycen uprostřed laťky z důvodu lepšího pohledu na úhloměr, který byl srovnán do vodorovné pozice s laťkou.

Při tomto experimentu šlo primárně o pozorování, zda má směr struktury skutečně vliv na úhel odtržení, než stanovit přesný úhel odtržení, což bylo dokázáno. Pro stanovení přesného úhlu odtržení by bylo potřeba přesnější měřicí zařízení, jež měří alespoň na desetiny stupně. V tomto případě bylo měřeno s přesností na půl stupně.



**Obrázek 15-** Měření úhlu odtržení kapky a) ve vodorovné pozici b) v momentě sklouznutí kapky po odtržení ze vzorku

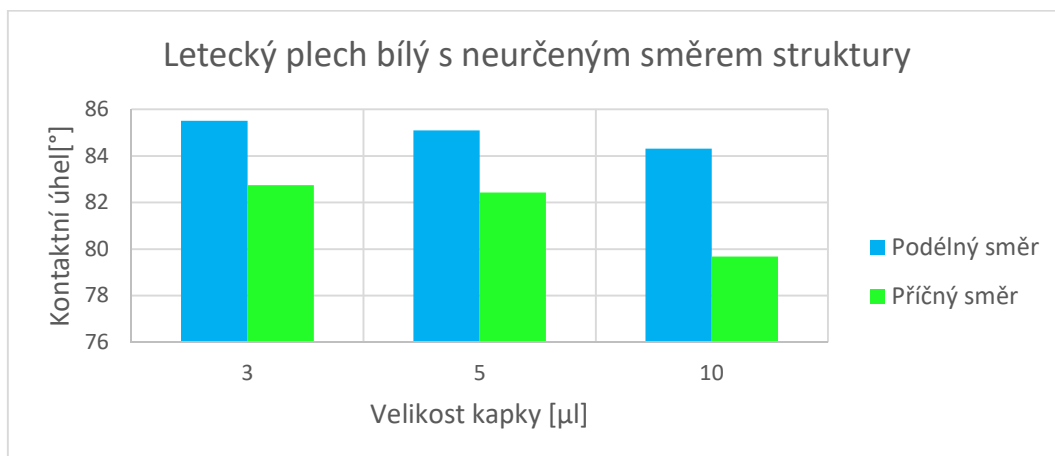
## 4 Výsledky a hodnocení měření

Všechna provedená měření jsou zaznamenána v tabulkách 12-23, které jsou přílohou práce. U každého vzorku bylo provedeno 10 měření pro každou velikost kapky v příčném i podélném směru vzorku. Pro úhel odtržení bylo naměřeno 6 hodnot. Vzorky jsou vyhodnoceny jednotlivě a pak také jako skupiny se stejnými směry struktury.

### 4.1 Vyhodnocení jednotlivých vzorků

Pro přehlednost je u každého vzorku vytvořen graf závislosti průměrného kontaktního úhlu na velikosti kapky vycházející z příslušné tabulky. V grafu jsou vedle sebe umístěny výsledky měření v podélném směru, ty jsou modré, a zelené v příčném směru vzorku. Rozdíl těchto dvou hodnot značí anisotropii kontaktního úhlu, která je z grafu patrná na první pohled. Hodnoty z grafu jsou obsaženy v tabulce a doplněny o úhel odtržení kapky.

## 4.1.1 Letecký plech bílý s neurčeným směrem struktury



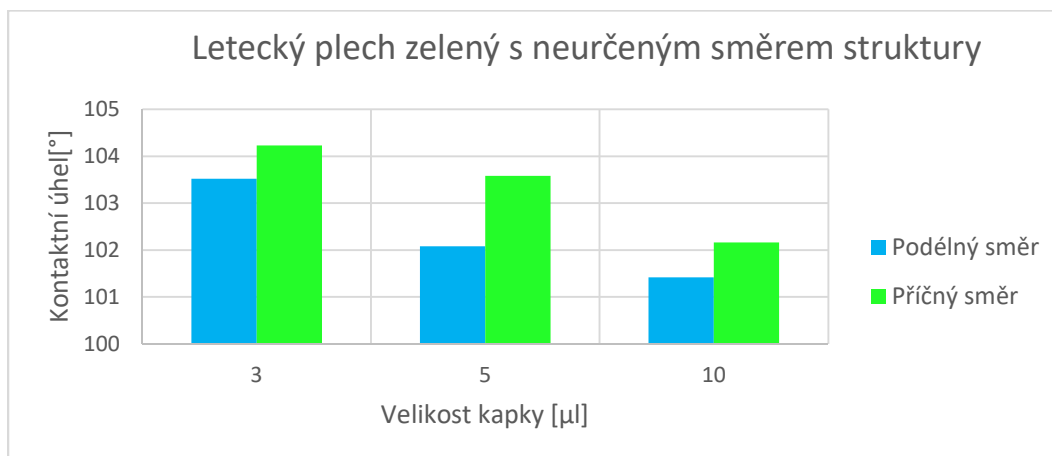
**Graf 1-** Velikost kontaktního úhlu leteckého bílého plechu v závislosti na velikosti kapky vody

**Tabulka 1-** Kontaktní úhel a úhel odtržení leteckého plechu bílého s neurčeným směrem struktury

Letecký plech bílý s neurčeným směrem struktury						
Velikost kapky [μl]	Kontaktní úhel [°]			Úhel odtržení [°]		
	Podélný směr	Příčný směr	Nesymetrie	Podélný směr	Příčný směr	Nesymetrie
3	85,5 ±1,00	82,75 ±2,52	2,75	Kapka se neodtrhne		
5	85,1 ±1,69	82,43 ±2,11	2,67	-	-	-
10	84,31 ±1,64	79,68 ±1,95	4,63	-	-	-

Letecký bílý plech je lehce hydrofilní. Kontaktní úhly dosahují  $79,68^{\circ} \pm 1,94$  až  $85,5^{\circ} \pm 1,00$  v závislosti na velikosti kapky a směru měření. Je pozorován klesající trend grafu, který odpovídá předpokladům. Vzorek vykazuje značnou nesymetrii přesahující  $2,5^{\circ}$ . Vzhledem k hladkosti struktury, jež byla pozorována pohledem a hmatem, se jedná o překvapivý výsledek. Směr struktury je odhadován v příčném směru z důvodu menších kontaktních úhlů. Po aplikaci kapka ulpí na vzorku při jakémkoli náklonu.

#### 4.1.2 Letecký plech zelený s neurčeným směrem struktury



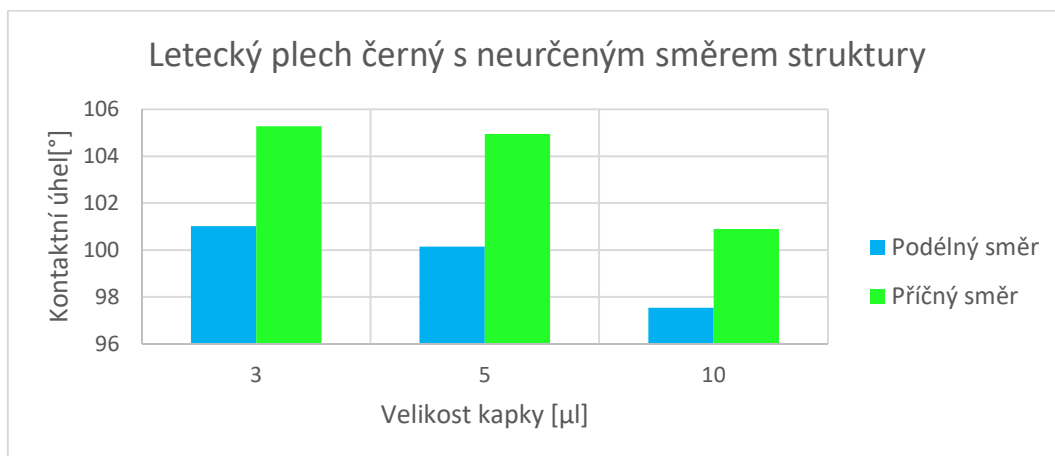
**Graf 2-** Velikost kontaktního úhlu leteckého zeleného plechu v závislosti na velikosti kapky vody

**Tabulka 2-** Kontaktní úhel a úhel odtržení leteckého plechu zeleného s neurčeným směrem struktury

Letecký plech zelený s neurčeným směrem struktury						
Velikost kapky [ $\mu\text{l}$ ]	Kontaktní úhel [°]			Úhel odtržení [°]		
	Podélný směr	Příčný směr	Nesymetrie	Podélný směr	Příčný směr	Nesymetrie
3	103,52 $\pm 1,57$	104,23 $\pm 0,58$	0,71	Kapka se neodtrhne		
5	102,08 $\pm 2,43$	103,58 $\pm 1,18$	1,5	-	-	-
10	101,42 $\pm 1,75$	102,16 $\pm 0,98$	0,74	-	-	-

Letecký zelený plech má kontaktní úhel  $101,42^\circ \pm 1,75$  až  $104,23^\circ \pm 0,58$ . Při rozdílu kontaktních úhlů v příčném a podélném směru, které klesají s rostoucí velikostí kapky, dochází k nejmenší anisotropii mezi leteckými plechy od  $0,71^\circ$  do  $1,5^\circ$ . Povrch nebyl hladký, a tak byla předpokládána větší nesymetrie. Směr struktury by se mohl nacházet v podélném směru. U hydrofobního povrchu bylo odtržení kapky očekávané při náklonu vzorku, to se však nepotvrdilo.

## 4.1.3 Letecký plech černý s neurčeným směrem struktury



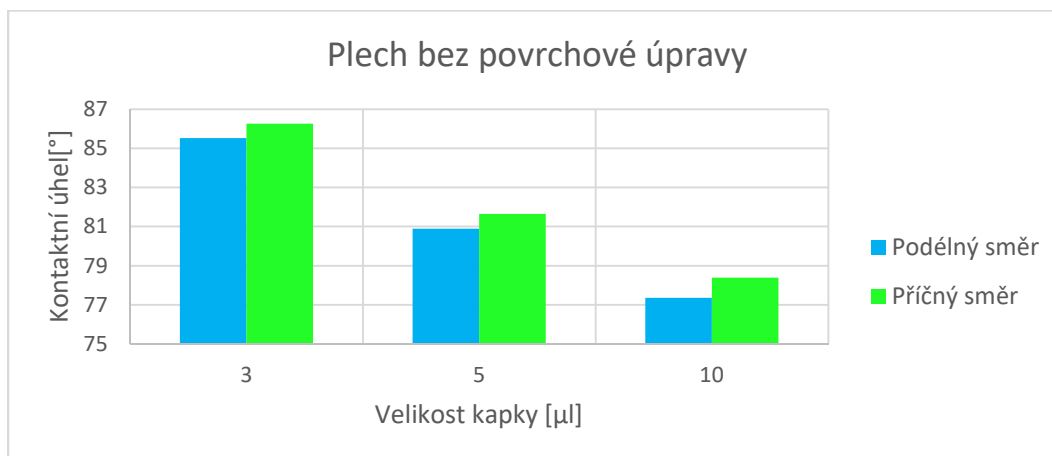
**Graf 3-** Velikost kontaktního úhlu leteckého černého plechu v závislosti na velikosti kapky vody

**Tabulka 3-** Kontaktní úhel a úhel odtržení leteckého plechu černého s neurčeným směrem struktury

Letecký plech černý s neurčeným směrem struktury						
Velikost kapky [ $\mu\text{l}$ ]	Kontaktní úhel [°]			Úhel odtržení [°]		
	Podélný směr	Příčný směr	Nesymetrie	Podélný směr	Příčný směr	Nesymetrie
3	101,02 $\pm 1,12$	105,28 $\pm 2,35$	4,25	Kapka se neodtrhne		
5	100,14 $\pm 2,15$	104,95 $\pm 1,42$	4,81	-	-	-
10	97,54 $\pm 1,02$	100,9 $\pm 2,10$	3,36	-	-	-

Černý letecký plech vykazuje největší kontaktní úhel  $97,54^{\circ} \pm 1,02$  až  $105,28^{\circ} \pm 2,35^{\circ}$  mezi leteckými plechy, a dokonce největší nesymetrii až  $4,81^{\circ}$  mezi všemi vzorky. Tento hydrofobní vzorek měl hrubý povrch, velká nesymetrie byla tedy předpokládána. Struktura odpovídá podélnému směru. Stejně jako u všech leteckých plechů ani zde nedošlo k odtržení kapky při náklonu vzorku (negativní vliv z hlediska možné námrazy na křídlech letadel).

#### 4.1.4 Plech bez povrchové úpravy



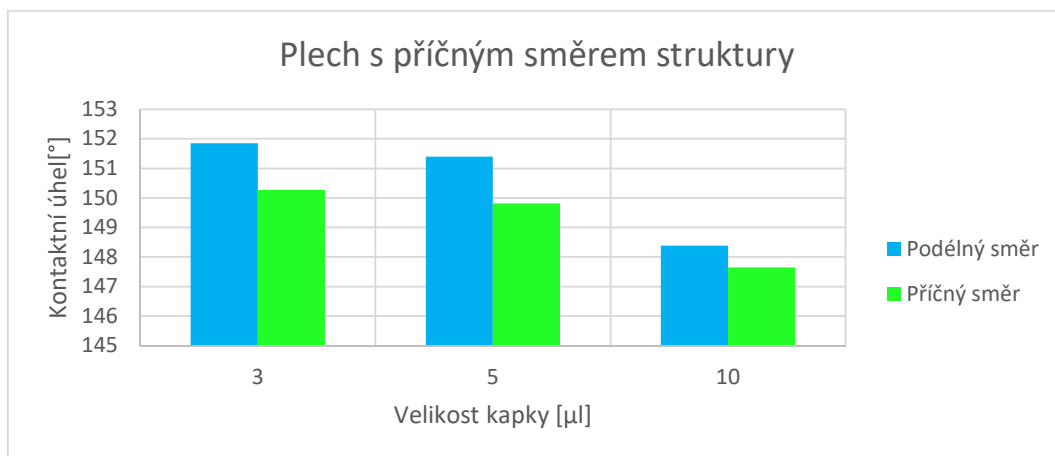
**Graf 4** - Velikost kontaktního úhlu plechu bez povrchové úpravy v závislosti na velikosti kapky vody

**Tabulka 4**- Kontaktní úhel a úhel odtržení plechu bez povrchové úpravy

Plech bez povrchové úpravy						
Velikost kapky [ $\mu\text{l}$ ]	Kontaktní úhel [°]			Úhel odtržení [°]		
	Podélný směr	Příčný směr	Nesymetrie	Podélný směr	Příčný směr	Nesymetrie
3	85,53 $\pm 3,89$	86,26 $\pm 3,69$	0,73	Kapka se neodtrhne		
5	80,9 $\pm 2,88$	81,64 $\pm 2,39$	0,74	-	-	-
10	77,35 $\pm 3,16$	78,38 $\pm 2,13$	1,03	-	-	-

Plech bez povrchové úpravy byl do měření zařazen kvůli porovnání s plechy, jež byly povlakované. Jedná se o nerez vykazující kontaktní úhel mezi  $77,35^\circ \pm 3,16$  až  $86,26^\circ \pm 3,69$  s menší nesymetrií okolo  $0,7^\circ$ , která je přibližně konstantní. Z hydrofilního plechu vznikne povlakováním až superhydrofobní povrch s kontaktními úhly téměř  $152^\circ$ . Takovému povrchu stačí maximální náklon  $4^\circ$  na odtržení kapky oproti nepovlakovanému, kde se kapka neodtrhne vůbec.

## 4.1.5 Plech s příčným směrem struktury



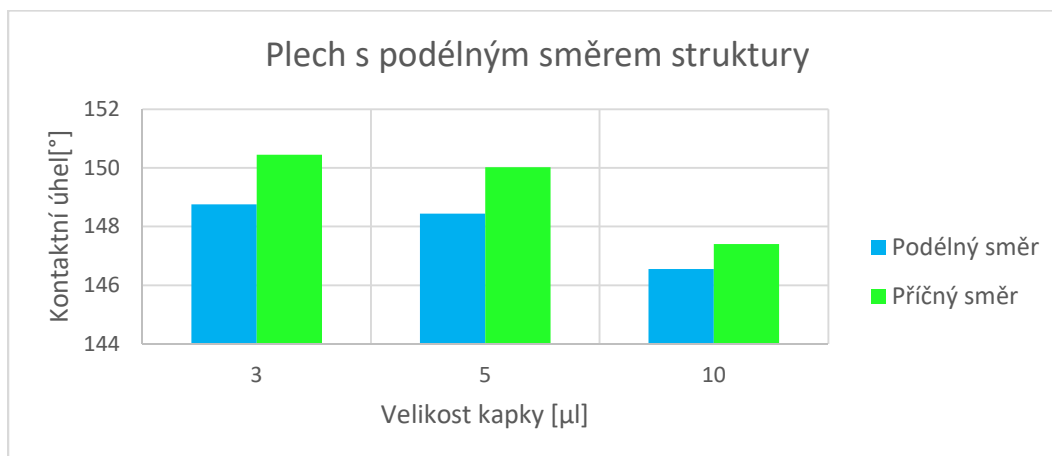
**Graf 5-** Velikost kontaktního úhlu plechu s příčným i podélným směrem struktury v závislosti na velikosti kapky vody

**Tabulka 5-** Kontaktní úhel a úhel odtržení plechu s příčným směrem struktury

Plech s příčným směrem struktury						
Velikost kapky [μl]	Kontaktní úhel [°]			Úhel odtržení [°]		
	Podélný směr	Příčný směr	Nesymetrie	Podélný směr	Příčný směr	Nesymetrie
3	151,85 ± 1,96	150,27 ± 1,51	1,58	3,67	3,25	0,42
5	151,4 ± 1,54	149,81 ± 1,65	1,59	-	-	-
10	148,38 ± 0,66	147,65 ± 1,93	0,73	-	-	-

Na plech byl nanesený povlak v příčném směru. Vznikl superhydrofobní povrch s kontaktním úhlem  $147,65 \pm 1,93$  až  $151,85 \pm 1,96$  vykazující nesymetrii okolo  $1,6^\circ$ . Směr struktury potvrzuje menší kontaktní úhel v příčném směru. Oproti ostatním hydrofobním povrchům je nesymetrie kapky velikosti  $5[\mu\text{l}]$  větší než  $3[\mu\text{l}]$  o setinu stupně. Toto zjištění je považováno za nepatrnou nepřesnost měření, protože rozdíl u jednosměrných struktur se pohybuje okolo desetiny. Také pro odtržení kapky v tomto směru stačí náklon  $3,25^\circ$ , což je o  $0,42^\circ$  méně než proti směru struktury.

#### 4.1.6 Plech s podélným směrem struktury



**Graf 6-** Velikost kontaktního úhlu plechu s podélným směrem struktury v závislosti na velikosti kapky vody

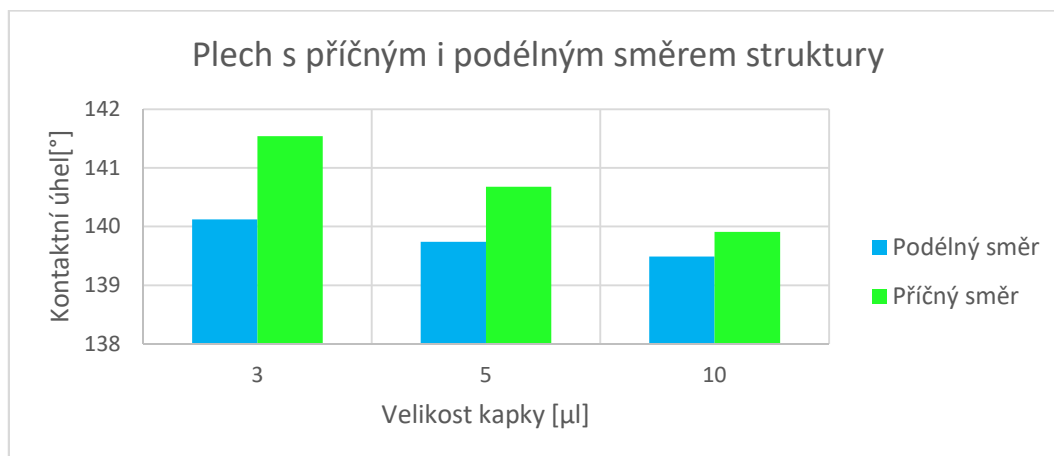
**Tabulka 6-** Kontaktní úhel a úhel odtržení plechu s podélným směrem struktury

Plech s podélným směrem struktury						
Velikost kapky [μl]	Kontaktní úhel [°]			Úhel odtržení [°]		
	Podélný směr	Příčný směr	Nesymetrie	Podélný směr	Příčný směr	Nesymetrie
3	148,76 ± 0,92	150,45 ± 1,62	1,69	3,00	3,58	0,58
5	148,44 ± 1,40	150,02 ± 1,43	1,58	-	-	-
10	146,55 ± 1,56	147,41 ± 1,27	0,86	-	-	-

Plech s podélným směrem struktury je superhydrofobní s kontaktním úhlem  $147,41 \pm 1,56$  až  $150,45 \pm 1,62$ . Nesymetrie kontaktního úhlu klesá od  $1,69^\circ$  do  $0,86^\circ$  s rostoucí velikostí kapky. Je zajímavé, že v porovnání s plechem s příčným směrem struktury je rozdíl velikosti kontaktního úhlu o  $1,5^\circ$  menší, ale přibližně o desetinu větší nesymetrie. Dále pak klesá úhel náklonu pro odtržení kapky, ale roste nesymetrie na  $0,58^\circ$ . Tyto rozdíly jsou přisuzovány povrchu, který je následně povlakovaný, jelikož základní povrch vykazuje nesymetrii, jež patrně dále ovlivňuje celkový výsledek povlakovaného povrchu.



## 4.1.7 Plech s příčným i podélným směrem struktury



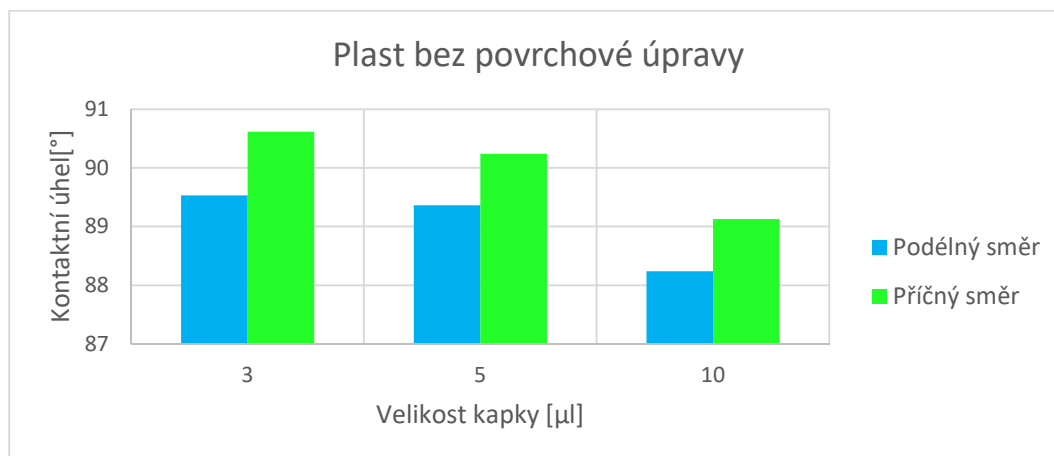
**Graf 7-** Velikost kontaktního úhlu plechus příčným i podélným směrem struktury v závislosti na velikosti kapky vody

**Tabulka 7-** Kontaktní úhel a úhel odtržení plechu s příčným i podélným směrem struktury

Plech s příčným i podélným směrem struktury						
Velikost kapky [μl]	Kontaktní úhel [°]			Úhel odtržení [°]		
	Podélný směr	Příčný směr	Nesymetrie	Podélný směr	Příčný směr	Nesymetrie
3	140,12 ± 0,73	141,54 ± 1,05	1,42	4,00	4,00	0,00
5	139,74 ± 1,08	140,68 ± 1,23	0,94	-	-	-
10	139,49 ± 1,26	139,91 ± 1,29	0,42	-	-	-

Struktury byly nanášeny kolmo na sebe. Oproti jednosměrným strukturám došlo ke snížení kontaktního úhlu přibližně o 10° na 139,49°±1,26 až 141,54±1,05. Výsledkem je menší nesymetrie 1,42°, která s rostoucí velikostí kapky klesá pozvolněji. Velikost kapky také nemá tak velký vliv na rozdíly ve velikosti kontaktních úhlů, což činí přibližně 2° mezi kapkou 3[μl] a 10[μl]. Velmi zajímavé zjištění přichází s velikostí úhlu odtržení. *I když měření dosahuje nesymetrie kontaktního úhlu, úhel odtržení má největší hodnotu z plechů, a to 4°, avšak nesymetrie je nulová.*

#### 4.1.8 Plast bez povrchové úpravy



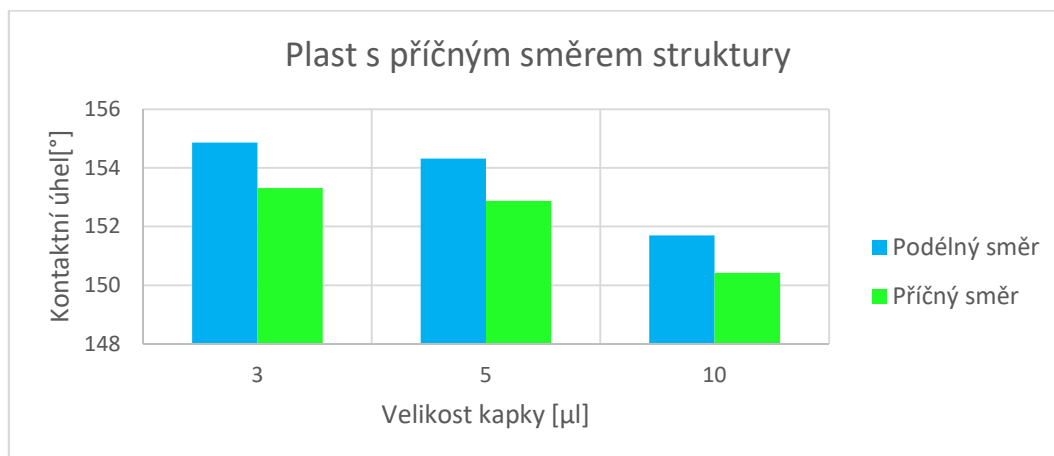
**Graf 8-** Velikost kontaktního úhlu plastu bez povrchové úpravy v závislosti na velikosti kapky vody

**Tabulka 8-** Kontaktní úhel a úhel odtržení plast bez povrchové úpravy

Plast bez povrchové úpravy						
Velikost kapky [μl]	Kontaktní úhel [°]			Úhel odtržení [°]		
	Podélný směr	Příčný směr	Nesymetrie	Podélný směr	Příčný směr	Nesymetrie
3	89,53 ± 2,66	90,62 ± 1,69	1,09	Kapka se neodtrhne		
5	89,36 ± 3,06	90,24 ± 1,55	0,88	-	-	-
10	88,24 ± 1,60	89,13 ± 1,84	0,89	-	-	-

Polypropylen s kontaktním úhlem  $88,24^{\circ} \pm 1,60$  až  $90,62^{\circ} \pm 1,69$  má relativně stabilní kontaktní úhel. Rozdíl mezi velikostmi kapky  $3[\mu\text{l}]$  a  $10[\mu\text{l}]$  je pouze lehce přes  $1^{\circ}$ . Povlakováním vzniká plast s kontaktním úhlem téměř  $155^{\circ}$ . Nesymetrie kontaktního úhlu klesá od 1,09 do 0,88, což proti ostatním vzorkům tvoří nepatrné rozdíly. Kapka ulpí na povrchu a při náklonu vzorku se neodtrhne. Z měření je patrné, že pravděpodobný směr struktury je v podélném směru.

## 4.1.9 Plast s příčným směrem struktury



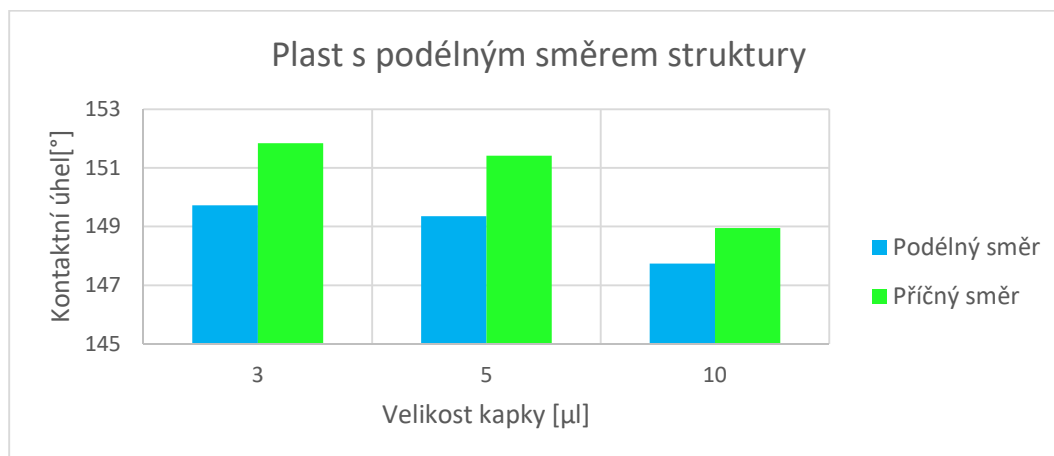
**Graf 9-** Velikost kontaktního úhlu plastu s příčným směrem struktury v závislosti na velikosti kapky vody

**Tabulka 9-** Kontaktní úhel a úhel odtržení plastu s příčným směrem struktury

Plast s příčným směrem struktury						
Velikost kapky [μl]	Kontaktní úhel [°]			Úhel odtržení [°]		
	Podélný směr	Příčný směr	Nesymetrie	Podélný směr	Příčný směr	Nesymetrie
3	154,87 ±1,15	153,31 ±1,13	1,56	4,75	4,17	0,58
5	154,32 ±1,74	152,88 ±1,62	1,44	-	-	-
10	151,70 ±1,61	150,42 ±2,21	1,28	-	-	-

Polypropylen s příčným směrem struktury dosahuje největších kontaktních úhlu od  $150,43^{\circ} \pm 2,21$  do  $154,87^{\circ} \pm 1,15$  ze všech měřených vzorků. Nesymetrie kontaktních úhlů v závislosti na velikosti kapky vykazuje mírně klesající tendenci od  $1,56^{\circ}$  do  $1,28^{\circ}$ . Bylo očekáváno, že u vzorku s největším kontaktním úhlem bude stačit nejmenší úhel náklonu pro odtržení kapky. Tato skutečnost se nestala. Naměřený úhel  $4,17^{\circ}$  byl největší potřebný úhel náklonu ve směru struktury a kolmo na strukturu byl dokonce  $4,75^{\circ}$ .

## 4.1.10 Plast s podélným směrem struktury



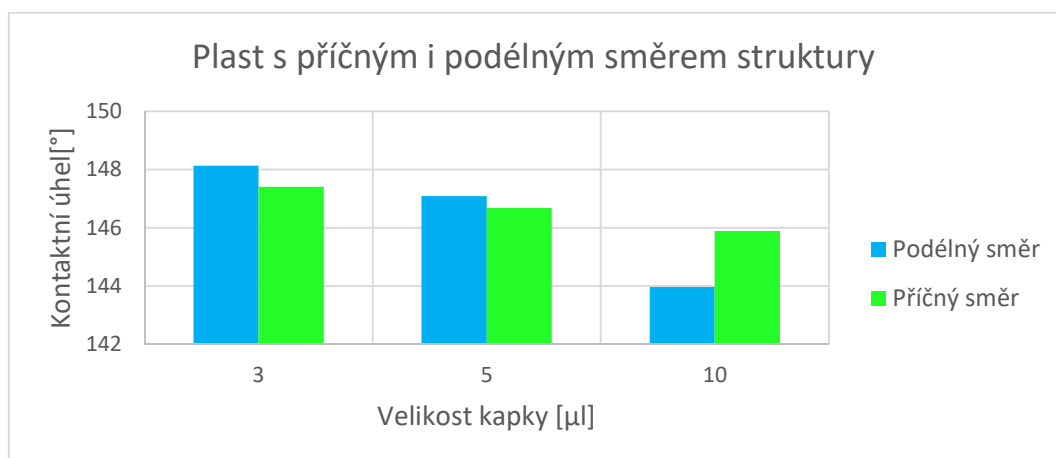
**Graf 10-** Velikost kontaktního úhlu plastu s podélným směrem struktury v závislosti na velikosti kapky vody

**Tabulka 10-** Kontaktní úhel a úhel odtržení plastu s podélným směrem struktury

Plast s podélným směrem struktury						
Velikost kapky [μl]	Kontaktní úhel [°]			Úhel odtržení [°]		
	Podélný směr	Příčný směr	Nesymetrie	Podélný směr	Příčný směr	Nesymetrie
3	149,72 ± 1,24	151,84 ± 1,19	2,12	4,42	3,75	0,67
5	149,35 ± 1,57	151,42 ± 0,94	2,07	-	-	-
10	147,74 ± 1,28	148,95 ± 2,18	1,21	-	-	-

Pouhá změna směru struktury z příčného na podélný směr snižuje velikosti kontaktního úhlu přibližně o 3° na 147,74°±1,28 až 151,84°±1,19 v závislosti na velikosti kapky. U polypropylenu s podélným směrem struktury je naopak pozorován nárůst nesymetrie okolo 0,5° až na 2,12°. Se zmenšením kontaktního úhlu také překvapivě klesá úhel náklonu potřebný pro odtržení kapky přibližně o 0,4°, ale nesymetrie vzrostla o desetinu.

## 4.1.11 Plast s příčným i podélným směrem struktury



**Graf 11-** Velikost kontaktního úhlu plastu s příčným i podélným směrem struktury v závislosti na velikosti kapky vody

**Tabulka 11-** Kontaktní úhel a úhel odtržení plastu s příčným i podélným směrem struktury

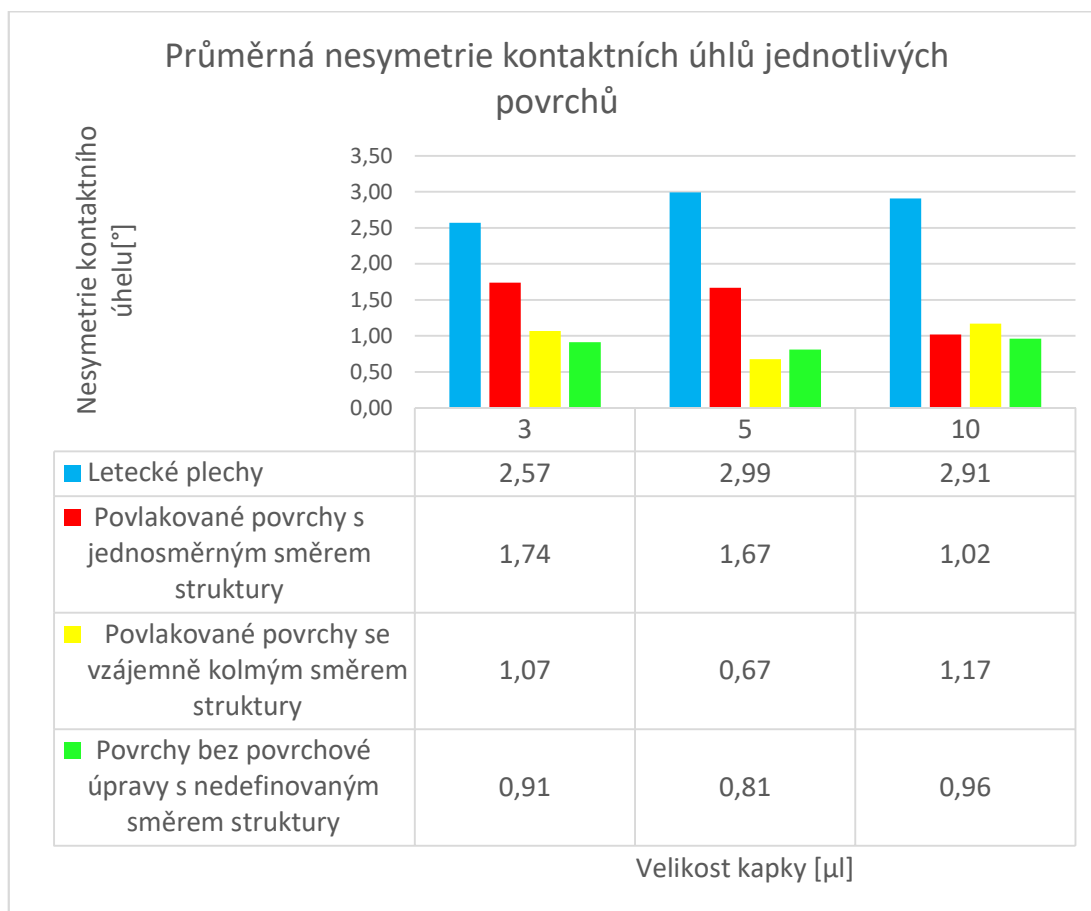
Plast s příčným i podélným směrem struktury						
Velikost kapky [μl]	Kontaktní úhel [°]			Úhel odtržení [°]		
	Podélný směr	Příčný směr	Nesymetrie	Podélný směr	Příčný směr	Nesymetrie
3	148,13 ± 1,60	147,41 ± 1,03	0,72	3,67	3,5	0,17
5	147,09 ± 1,05	146,68 ± 1,38	0,41	-	-	-
10	143,97 ± 1,15	145,89 ± 1,28	1,92	-	-	-

Polypropylen s příčným i podélným směrem struktury vykazuje dle předpokladu nižší kontaktní úhly než jednosměrné struktury. Z grafu je patrná chyba měření kapky velikosti 10μl v podélném směru, která dle trendu grafů má mít větší kontaktní úhel než v příčném směru. U dvou menších velikostí kapek je pozorováno snížení nesymetrie o více než polovinu oproti jednosměrným strukturám. Zajímavé zjištění přichází s pozorováním úhlu náklonu při odtržení kapky. *Polypropylen s nejmenším kontaktním úhlem a nesymetrií vykazuje také nejmenší úhel odtržení, a to 3,67° v podélném a 3,5° v příčném směru, s téměř nulovou nesymetrií.*

## 4.2 Souhrnné vyhodnocení výsledků

Vzorky byly rozděleny do tří skupin. První se zabývá nesymetrií kontaktního úhlu podle směru struktury, druhá porovnává struktury plechů a třetí plastů. Pro přehlednost je vyhodnocení doplněno o grafy závislosti nesymetrie kontaktního úhlu na velikosti kapky. V grafu jsou barevně rozlišeny čtyři skupiny. Letecké plechy jsou označeny modře, jednosměrné struktury červeně, struktury se vzájemně kolmým směrem žlutě a bez povlaku zeleně. Graf je doplněný tabulkou dat s konkrétními hodnotami nesymetrie kontaktních úhlů.

## 4.2.1 Průměrná nesymetrie kontaktních úhlů jednotlivých povrchů

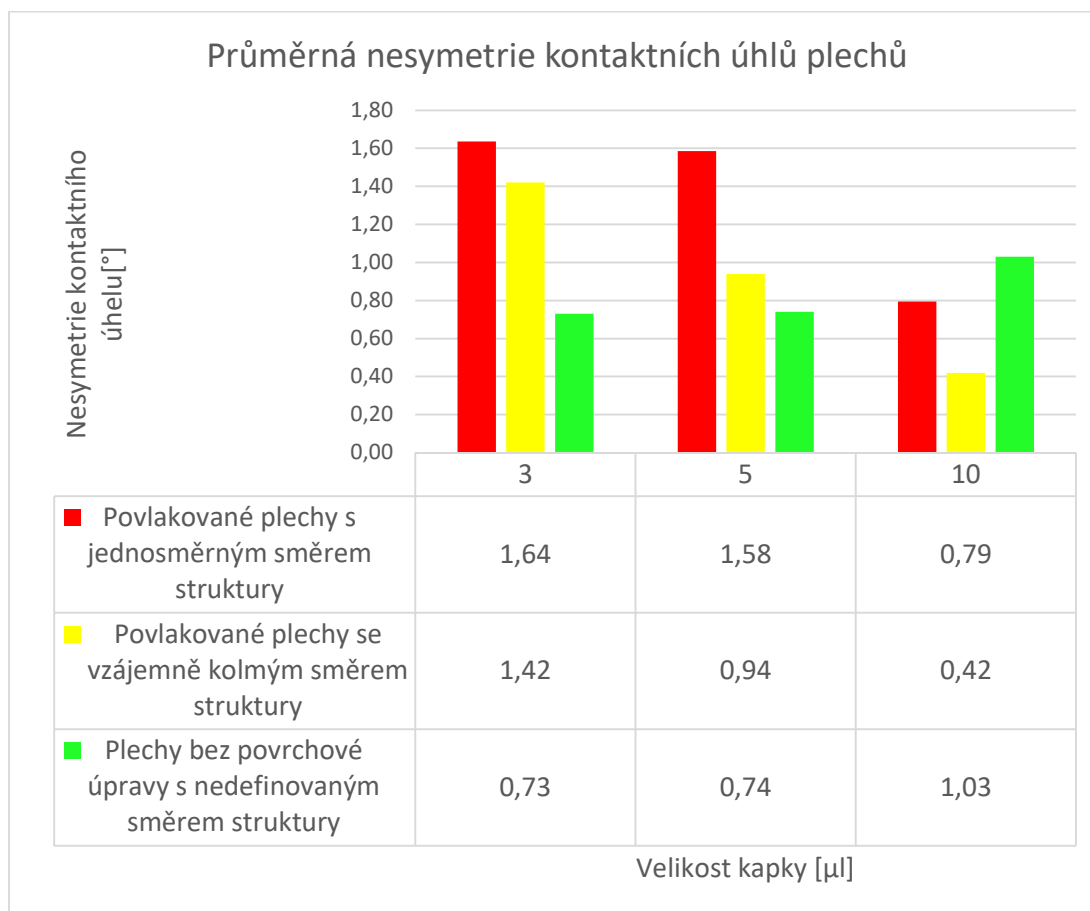


**Graf 12-** Průměrná nesymetrie kontaktních úhlů jednotlivých povrchů

Vzorky byly rozděleny do skupin podle směru struktury. Letecké plechy a vzorky bez povrchové úpravy neměly definovanou strukturu, ale na základě menšího kontaktního úhlu ve směru struktury byl tento směr odhadnut. Z grafu je patrné, že letecké plechy mají největší nesymetrii kontaktního úhlu, která dokonce s rostoucí velikostí kapky roste. Ostatní vzorky vykazují klesající nesymetrii s rostoucí velikostí kapky. Výsledné nesymetrie kapek o velikosti 10 $\mu\text{l}$  jsou označeny za zavádějící, jelikož takto velké kapky jsou velmi ovlivněny gravitací a neodpovídají trendu grafu.

V porovnání povlakovaných a nepovlakovaných vzorků je pozorována největší nesymetrie u jednosměrné struktury. Největší pokles nesymetrie je zaznamenán u vzájemně kolmé struktury. Zajímavé je, že *nepovlakovaný povrch a povlakovaný se vzájemně kolmým směrem struktury mají velmi podobnou nesymetrii kontaktního úhlu, a nepovlakované povrchy dokonce vůbec nějakou nesymetrii vykazují.*

## 4.2.2 Průměrná nesymetrie kontaktních úhlů plechů

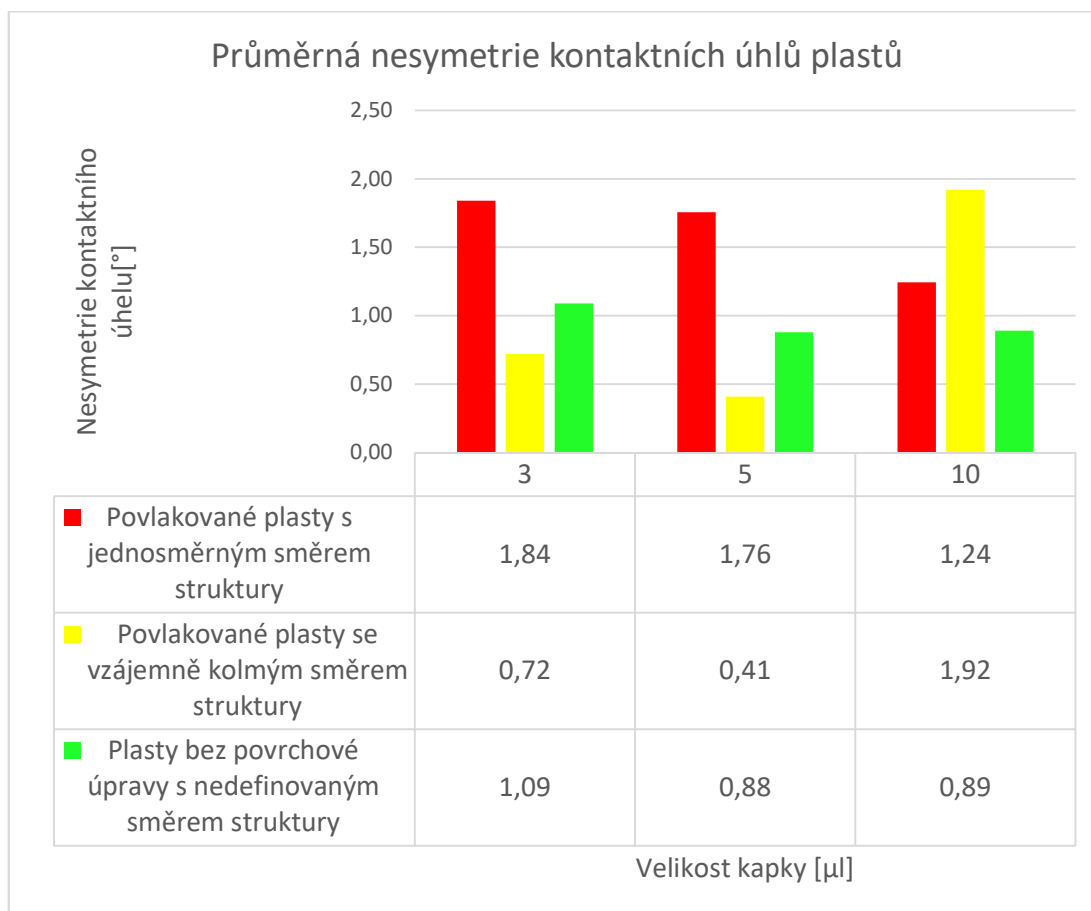


**Graf 13-** Průměrná nesymetrie kontaktních úhlů plechů

Povlakováním plechů dochází ke zvýšení nesymetrie v obou případech směrů struktury a s rostoucí velikostí kapky velikost nesymetrie klesá. U vzájemně kolmých směrů mnohem rychleji než u jednosměrného směru struktury. U povlakovaných plechů se i velké kapky chovají podle trendu grafu, avšak je nutné brát tyto výsledky s rezervou. Nepovlakovaný povrch má přibližně konstantní nesymetrii v závislosti na velikosti kapky.



## 4.2.3 Průměrná nesymetrie kontaktních úhlů plastů



Graf 14- Průměrná nesymetrie kontaktních úhlů plastů

Povlakování má na polypropylen jiný vliv než na plech. U jednosměrné struktury dochází ke zvýšení nesymetrie, ale u vzájemně kolmé struktury ke snížení. Nesymetrie s rostoucí velikostí kapky klesá u všech typů povlaků, nejrychleji u vzájemně kolmé struktury. Z trendu grafu pozorujeme, že velikost nesymetrie u vzájemně kolmé struktury by se měla blížit nule. Proto je výsledek měření kapky velikosti 10 $\mu\text{l}$  považovaný za chybný z důvodu velkého ovlivnění vnějšími silami a velikostí kapky. U zbylých vzorků by chování kapky mohlo být považováno za orientační.

## Závěr

Práce se zabývá problematikou chování kapky vody na hydrofobním až superhydrofobním povrchu. Tvar kapky je ovlivněn hlavně gravitací, velikostí kapky a strukturou povrchu. Struktura povrchu může připomínat různé tvary. Podstatné však je, že ležící kapka je v kontaktu pouze s vrcholky struktury a zbytek leží na vzduchovém polštáři. S rostoucí hydrofobitou povrchu klesá hystereze, jejíž důsledek představuje změna typu pohybu ze stékání na odvalování. Směr struktury neovlivňuje jen kontakt kapky s povrchem, ale také velikost kontaktních úhlů v závislosti na směru struktury. Je to důsledek překonávání energetických bariér, které jsou ve směru struktury menší než ve směru kolmém.

Určení kontaktního úhlu je základní metoda pro určení vlastností materiálu z pohledu hydromechaniky. Bylo provedeno měření jedenácti vzorků s hlavním cílem pozorovat, zda dochází k anisotropii kontaktního úhlu, a zjistit, jaký na něj má vliv směr struktury. Vzorky měly různé úhly smáčení od  $75^\circ$  do  $155^\circ$  a většina z nich definované směry nanesené hydrofobní vrstvy. Dalším faktorem bylo provedení měření pro různé velikosti kapek ( $3\mu\text{l}$ ,  $5\mu\text{l}$  a  $10\mu\text{l}$ ) pro posouzení vlivu velikosti na výsledek.

Naměřené hodnoty kapek velikosti  $10\mu\text{l}$  vždy neodpovídají předpokladům a trendům grafů. To je přisuzováno velkému ovlivnění gravitací, a proto jsou tyto výsledky považovány pouze za orientační. Měření s velikostí kapky  $5\mu\text{l}$  lze ještě považovat za přesné. V porovnání s velikostí kapky  $3\mu\text{l}$  byly zpravidla kontaktní úhly menší přibližně o  $0,5^\circ$  až  $1^\circ$  a jejich nesymetrie byla menší o  $0,5^\circ$ .

Z měření jasně vyplývá, že kontaktní úhel ležící kapky na hydrofobním povrchu vykazuje anisotropii a je zásadně ovlivněn její velikostí. S rostoucí velikostí kapky klesá velikost kontaktního úhlu. U plechů i plastů dochází ke snižování nesymetrie s rostoucí velikostí kapky pro velikost  $3\mu\text{l}$  a  $5\mu\text{l}$ , naopak u leteckých plechů anisotropie roste. Bylo předpokládáno, že při aplikaci jednosměrné struktury nezáleží na směru nanášení a ve směru struktury budou hodnoty vykazovat stejné kontaktní úhly a nesymetrie. Tento předpoklad byl chybný a z měření vyplývá, že *velikost kontaktního úhlu a jeho nesymetrie je rozdílná v závislosti na směru aplikace jednosměrné struktury. Tento fakt je přisuzován vlivu povrchu, na který je povlak nanášen, na celkový kontaktní úhel a jeho*

*nesymetrii, jelikož bylo naměřeno, že nepovlakovaný povrch vykazuje také nesymetrii, a to přibližně 0,9°.*

Dalším faktorem při měření byl směr struktury povrchu. S touto souvislostí bylo také provedeno pozorování úhlu odtržení kapky při náklonu. Jednosměrné struktury vykazují největší nesymetrii jak v kontaktním úhlu, tak v úhlu odtržení. *Jednosměrné struktury sice vykazují největší nesymetrii úhlu odtržení, ale není pravidlem, že se z nich kapka dříve odtrhne. Například u polypropylenu dochází k odtržení kapky dříve u vzájemně kolmé struktury než u jednosměrné.* Pokud je zvolena aplikace jednosměrné struktury, měly být povlaky nanášeny ve směru případného tečení kapky z důvodu větší efektivity při odtržení kapky. Například směr nanesení povlaku na čelní sklo automobilu by měl odpovídat směru obtékání vzduchu kolem skla. *Zajímavostí je, že vzájemně kolmé struktury vykazují nesymetrii kontaktního úhlu, avšak nesymetrie úhlu odtržení je téměř nulová.*

V experimentech, které jsou spojené s měřením kontaktního úhlu, je třeba zvážit vliv anisotropie na celkové výsledky, jelikož některé naměřené hodnoty u hydrofobních povrchů a leteckých plechů dokonce překročily velikost 2° a nepovlakované vzorky vykazují nesymetrii také.

V práci jsou shrnuty základní poznatky o chování kapek vody na hydrofobních površích z pohledu statiky. Mnohem podstatnější je však proudění kapaliny (vody), se kterým se v praxi setkáváme daleko častěji. Vzhledem k množství použitých vzorků a počtu provedených měření lze výsledné hodnoty a závěry považovat za reálné. Z této práce lze vycházet a rozšířit ji v otázce vlivu struktury na proudění po hydrofobních površích.

## Seznam použité literatury

- [1] ŠOB, F. *Hydromechanika*. Brno: CERM, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2037-5.
- [2] KŘÍŽ, M. *Hydrofilita a hydrofobicita jako klíč k řízení vlastností povrchů* [online]. Brno, 2009 [cit. 2017-03-22]. Diplomová práce. MASARYKOVA UNIVERZITA, Přírodovědecká fakulta, Ústav biochemie. Vedoucí práce Mgr. Jan Příbyl Ph.D.
- [3] HOLUB, J. Smáčivost povrchu vůči kapalinám a druhá viskozita kapalin. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Simona Fialová, Ph.D.
- [4] Contact Angle and Wetting Properties. YUAN, Y. a T. R. LEE. *Surface science techniques*. New York: Springer, 2013, s. 3-34. ISBN 978-3-642-34242-4.
- [5] PTOŠKOVÁ, B. *Charakterizace superhydrofobních povrchů* [online]. Zlín, 2015 [cit. 2017-03-22]. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Vedoucí práce Doc. Mgr. Aleš Mráček, Ph.D.
- [6] KARPÍŠEK, Z. *Matematika IV: statistika a pravděpodobnost*. Vyd. 2., dopl. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-214-2522-9.
- [7] CHUNG, J. Y., J. P. YOUNGBLOOD a Christopher M. STAFFORD. Anisotropic wetting on tunable micro-wrinkled surfaces. *Soft Matter* [online]. 2007, **3**(9), 1163–1169 [cit. 2017-03-22]. DOI: 10.1039/b705112c. ISSN 1744-683x.
- [8] FORD, J. Hydrophobic coating prevents the build-up of ice on aircraft. *The ENGINEER* [online]. 2012 [cit. 2017-03-27].
- [9] DARMANIN, T. a F. GUITTARD. Superhydrophobic and superoleophobic properties in nature. *Materials today* [online]. 2015, **5**(18), 273-285 [cit. 2017-03-27].
- [10] PING, G, L YOUNG, K EHMANN a J CAO. CIRP Annals - Manufacturing Technology. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2014, 553-556 [cit. 2017-03-29].

- [11] KUBIAK, K. J. a T. G. MATHIA. Anisotropic Wetting of Hydrophobic and Hydrophilic Surfaces - Modelling by Lattice Boltzmann Method. *Procedia Engineering* [online]. 2014, (79), 45-48 [cit. 2017-03-29].
- [12] HENSEL, R., Ch. NEINHUIS a C. WERNER. The springtail cuticle as a blueprint for omniphobic surfaces. *Chem. Soc. Rev* [online]. 2016, **45**(2), 323-341 [cit. 2017-04-04]. DOI: 10.1039/C5CS00438A. ISSN 0306-0012
- [13] L., Yang, Liandong Y., Z. ZHANG, et al. Biomimetic surfaces with anisotropic sliding wetting by energy-modulation femtosecond laser irradiation for enhanced water collection. *RSC Adv* [online]. 2017, **7**(18), 11170-11179 [cit. 2017-04-04]. DOI: 10.1039/C6RA28174E. ISSN 2046-2069
- [14] MOHAMED, A., A. ABDULLAH, N. YOUNAN, et al. Corrosion behavior of superhydrophobic surfaces: A review. *Arabian Journal of Chemistry* [online]. 2015, **8**(6), 749-765 [cit. 2017-04-04]. DOI: 10.1016/j.arabjc.2014.03.006. ISSN 18785352.
- [15] WEISTRON CO. *Contact Angle Meter* [online]. [cit. 2017-04-07].
- [16] YONG, J., Q. YANG, F. CHEN, D. ZHANG, U. FAROOQ, G. DU a X. HOU. A simple way to achieve superhydrophobicity, controllable water adhesion, anisotropic sliding, and anisotropic wetting based on femtosecond-laser-induced line-patterned surfaces. *Journal of Materials Chemistry A* [online]. 2014, **2**(15), 5499- [cit. 2017-04-07]. DOI: 10.1039/c3ta14711h. ISSN 2050-7488.
- [17] LIANG, Y., L. SHU, W. NATSU a F. HE. Anisotropic wetting characteristics versus roughness on machined surfaces of hydrophilic and hydrophobic materials. *Applied Surface Science* [online]. 2015, **331**, 41-49 [cit. 2017-04-07]. DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.12.071. ISSN 01694332.
- [18] KEDROŇOVÁ, E. *Měření kontaktního úhlu sedící kapky jako metoda charakterizace povrchu*. *ChemPoint* [online]. 2012 [cit. 2017-05-08].

## Seznam použitých symbolů a zkratek

$\gamma_{sl}$	[°]	kontaktní úhel mezi kapalinou a pevnou látkou
$\gamma_{lg}$	[°]	konstantní úhel mezi kapalinou a plynem
$\gamma_{sg}$	[°]	kontaktní úhel mezi pevnou látkou a plynem
H	[°]	hystereze kontaktního úhlu
$\theta_a$	[°]	úhel postupující
$\theta_r$	[°]	úhel ustupující
PDMS		polydimethylsiloxan
SEE System		Surface Energy Evaluation System (systém vyhodnocení povrchové energie)
CCD		charge coupled device (obrazový senzor)

## Seznam obrázků

<b>Obrázek 1-</b> Kontaktní úhel .....	14
<b>Obrázek 2-</b> Kapka vody ve vesmírné stanici .....	15
<b>Obrázek 3-</b> Povrchové napětí .....	15
<b>Obrázek 4-</b> Metody měření hystereze kontaktního úhlu a) objemová metoda b) metoda nakloněné roviny (upraveno [15]).....	16
<b>Obrázek 5-</b> Modely kontaktu kapky s hladkým a drsným povrchem .....	17
<b>Obrázek 6-</b> Kapka ve stavu Cassie- Baxter vlevo přejde do stavu Wenzel vpravo [12]..	17
<b>Obrázek 7-</b> Superhydrofobní list rýže a) rýžový list s kapkou vody b) struktura rýžového listu c) schéma hierarchické struktury rýžového listu (upraveno z [13]).....	18
<b>Obrázek 8-</b> Typy kontaktu kapky vody s různými strukturami povrchů (upraveno [12]) .....	18
<b>Obrázek 9-</b> Chování vodní kapky na strukturovaném povrchu (upraveno [17]).....	19
<b>Obrázek 10-</b> Proces ulpívání mlhy na hydrofobním povrchu (upraveno z [13]) .....	20
<b>Obrázek 11-</b> a) Vzorek s nečistotami b) Sesbírání nečistot ze vzorku c) Princip zachycení nečistoty do kapky d) Stékání kapky po vychýlené struktuře (upraveno [13] a [16]) ....	20
<b>Obrázek 12-</b> Aplikace kapek vody na superhydrofobní povrch a-e) pomocí jehly f-h) pomocí pipety .....	22
<b>Obrázek 13-</b> Model směrů a kontaktních úhlů použitých při popisu a měření.....	23
<b>Obrázek 14 -</b> Měření kontaktního úhlu pomocí SEE System a) Pořizování snímku kapky umístěné na vzorku CCD kamerou b) Vyhodnocení kontaktního úhlu dané kapky v softwaru SEE Software .....	24
<b>Obrázek 15-</b> Měření úhlu odtržení kapky a) ve vodorovné pozici b) v momentě sklouznutí kapky po odtržení ze vzorku.....	25

## Seznam tabulek

<b>Tabulka 1-</b> Kontaktní úhel a úhel odtržení leteckého plechu bílého s neurčeným směrem struktury.....	27
<b>Tabulka 2-</b> Kontaktní úhel a úhel odtržení leteckého plechu zeleného s neurčeným směrem struktury.....	28
<b>Tabulka 3-</b> Kontaktní úhel a úhel odtržení leteckého plechu černého s neurčeným směrem struktury.....	29
<b>Tabulka 4-</b> Kontaktní úhel a úhel odtržení plechu bez povrchové úpravy .....	30
<b>Tabulka 5-</b> Kontaktní úhel a úhel odtržení plechu s příčným směrem struktury .....	31
<b>Tabulka 6-</b> Kontaktní úhel a úhel odtržení plechu s podélným směrem struktury .....	32
<b>Tabulka 7-</b> Kontaktní úhel a úhel odtržení plechu s příčným i podélným směrem struktury .....	33
<b>Tabulka 8-</b> Kontaktní úhel a úhel odtržení plast bez povrchové úpravy .....	34
<b>Tabulka 9-</b> Kontaktní úhel a úhel odtržení plastu s příčným směrem struktury .....	35
<b>Tabulka 10-</b> Kontaktní úhel a úhel odtržení plastu s podélným směrem struktury .....	36
<b>Tabulka 11-</b> Kontaktní úhel a úhel odtržení plastu s příčným i podélným směrem struktury .....	37
<b>Tabulka 12-</b> Kontaktní úhly a úhly odtržení leteckého bílého plechu .....	51
<b>Tabulka 13-</b> Kontaktní úhly a úhly odtržení leteckého zeleného plechu.....	52
<b>Tabulka 14-</b> Kontaktní úhly a úhly odtržení leteckého zeleného plechu.....	53
<b>Tabulka 15-</b> Kontaktní úhly a úhly odtržení plechu bez povrchové úpravy.....	54
<b>Tabulka 16-</b> Kontaktní úhly a úhly odtržení plechu s podélným směrem struktury .....	55
<b>Tabulka 17 -</b> Kontaktní úhly a úhly odtržení plechu s příčným směrem struktury.....	56
<b>Tabulka 18 -</b> Kontaktní úhly a úhly odtržení plechu s přímým i podélným směrem struktury .....	57
<b>Tabulka 19 -</b> Kontaktní úhly a úhly odtržení plastu bez povrchové úpravy.....	58
<b>Tabulka 20 -</b> Kontaktní úhly a úhly odtržení plastu s příčným směrem struktury.....	59
<b>Tabulka 21 -</b> Kontaktní úhly a úhly odtržení plastu s podélným směrem struktury.....	60
<b>Tabulka 22 -</b> Kontaktní úhly a úhly odtržení plastu s příčným i podélným směrem struktury .....	61
<b>Tabulka 23 -</b> Souhrnné vyhodnocení vzorků.....	62



## Seznam grafů

<b>Graf 1-</b> Velikost kontaktního úhlu leteckého bílého plechu v závislosti na velikosti kapky vody.....	27
<b>Graf 2-</b> Velikost kontaktního úhlu leteckého zeleného plechu v závislosti na velikosti kapky vody .....	28
<b>Graf 3-</b> Velikost kontaktního úhlu leteckého černého plechu v závislosti na velikosti kapky vody .....	29
<b>Graf 4 -</b> Velikost kontaktního úhlu plechu bez povrchové úpravy v závislosti na velikosti kapky vody .....	30
<b>Graf 5-</b> Velikost kontaktního úhlu plechu s příčným i podélným směrem struktury v závislosti na velikosti kapky vody .....	31
<b>Graf 6-</b> Velikost kontaktního úhlu plechu s podélným směrem struktury v závislosti na velikosti kapky vody.....	32
<b>Graf 7-</b> Velikost kontaktního úhlu plechu s příčným i podélným směrem struktury v závislosti na velikosti kapky vody .....	33
<b>Graf 8-</b> Velikost kontaktního úhlu plastu bez povrchové úpravy v závislosti na velikosti kapky vody .....	34
<b>Graf 9-</b> Velikost kontaktního úhlu plastu s příčným směrem struktury v závislosti na velikosti kapky vody.....	35
<b>Graf 10-</b> Velikost kontaktního úhlu plastu s podélným směrem struktury v závislosti na velikosti kapky vody.....	36
<b>Graf 11-</b> Velikost kontaktního úhlu plastu s příčným i podélným směrem struktury v závislosti na velikosti kapky vody .....	37
<b>Graf 12-</b> Průměrná nesymetrie kontaktních úhlů jednotlivých povrchů.....	39
<b>Graf 13-</b> Průměrná nesymetrie kontaktních úhlů plechů.....	40
<b>Graf 14-</b> Průměrná nesymetrie kontaktních úhlů plastů.....	41

## Seznam příloh

Příloha 1 - Naměřené a vyhodnocené kontaktní úhly a úhly odtržení vzorků leteckých plechů

Příloha 2 - Naměřené a vyhodnocené kontaktní úhly a úhly odtržení vzorků nerezových plechů

Příloha 3 - Naměřené a vyhodnocené kontaktní úhly a úhly odtržení polypropylenových vzorků

Příloha 4 - Souhrnné vyhodnocení vzorků

## Příloha 1 - Naměřené a vyhodnocené kontaktní úhly a úhly odtržení vzorků leteckých plechů

Tabulka 12- Kontaktní úhly a úhly odtržení leteckého bílého plechu

Vzorek	Letecký plech bílý s neurčeným směrem struktury										Úhel náklonu při odtržení kapky	
	Kontaktní úhel		Příčný		Příčný		Příčný		Podélný	Příčný	Podélný	Příčný
Úhel měření [°]	3	5	10	3	5	10	3	5	10	3	3	
Pohled												
Velikost kapky [μl]												
Měření 1	84,5	83,6	83,2	83,8	81,4	81,4	83,8	81,4	77,7	Neodtrne se	Neodtrne se	
Měření 2	86,6	83,2	86,3	84,2	82,6	82,6	84,2	82,6	81,3	Neodtrne se	Neodtrne se	
Měření 3	87,4	87,2	86,6	85	77,6	83	85	77,6	83	Neodtrne se	Neodtrne se	
Měření 4	84,8	83,7	83,5	77,7	82,4	79,9	77,7	82,4	79,9	Neodtrne se	Neodtrne se	
Měření 5	85,7	84,5	83,8	81,1	83,4	78,3	81,1	83,4	78,3	Neodtrne se	Neodtrne se	
Měření 6	84,7	87,7	81,7	86,4	80,9	78	86,4	80,9	78	Neodtrne se	Neodtrne se	
Měření 7	86,8	87,8	86,1	85,2	83,6	79,1	85,2	83,6	79,1			
Měření 8	84,8	84,2	83,4	81,8	85,4	77,5	81,8	85,4	77,5			
Měření 9	85	84	85,8	80,3	85	79,1	80,3	85	79,1			
Měření 10	84,7	85,1	82,7	82	82	82,9	82	82	82,9			
Průměr	85,5	85,1	84,31	82,75	82,43	79,68	82,75	82,43	79,68	Neodtrne se	Neodtrne se	
Směrodatná odchylka	1,00	1,69	1,64	2,52	2,11	1,95	2,52	2,11	1,95	Neodtrne se		
Nesymetrie úhlu odtrhnutí												
Nesymetrie kontaktního úhlu	2,75	2,67	4,63									
Rozdíly velikosti úhlů:												
mezi kapkami 3μl a 5μl	0,4											
mezi kapkami 5μl a 10μl	0,79											
mezi kapkami 3μl a 10μl	1,19	0,32	2,75	3,07								

Tabulka 13- Kontaktní úhly a úhly odtržení leteckého zeleného plechu

Vzorek	Letecký plech zelený s neurčeným směrem struktury												
	Kontaktní úhel			Příčný			Příčný			Úhel náklonu při odtržení			
Úhel měření [°]	Podélný	3	5	10	3	5	10	3	5	10	Podélný	Příčný	3
Pohled													
Velikost kapky [μl]													
Měření 1		103,4	102,1	100,4	103,8	102,2	102,9	102,9	102,2	102,9	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se
Měření 2		103,5	106,4	101,5	105	103,9	102,3	102,3	103,9	102,3	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se
Měření 3		105,1	97,2	100	105,4	101,4	101,9	101,9	101,4	101,9	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se
Měření 4		105,2	102,5	102,5	104,6	105,2	100,1	100,1	105,2	100,1	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se
Měření 5		103	99,4	101,1	104,3	104,9	102,1	102,1	104,9	102,1	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se
Měření 6		105,8	100,9	102,5	103,7	103,9	100,9	100,9	103,9	100,9	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se
Měření 7		101	102,7	103,3	103,9	102,8	103,6	103,6	103,9	102,8			
Měření 8		101,3	103,1	101,5	103,8	103,6	102,9	102,9	103,6	102,9			
Měření 9		102,3	101,9	97,5	104,3	104,9	102,9	102,9	104,9	102,9			
Měření 10		104,6	104,6	103,9	103,5	103	102	102	103	102			
Průměr		103,52	102,08	101,42	104,23	103,58	102,16	102,16	103,58	102,16	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se
Směrodatná odchylka		1,57	2,43	1,75	0,58	1,18	0,98	0,98	1,18	0,98			
Nesymetrie úhlu odtrhnutí		0,71	1,5	0,74									Neodtrne se
Nesymetrie kontaktního úhlu													
Rozdíl velikosti úhlů:													
mezi 3 a 5		1,44			0,65								
mezi 5 a 10		0,66			1,42								
mezi 3 a 10		2,1			2,07								

**Tabulka 14-** Kontaktní úhly a úhly odtržení leteckého zeleného plechu

Vzorek	Letecký plech černý s neurčeným směrem struktury											
	Kontaktní úhel			Příčný			Úhel náklonu při odtržení			Úhel náklonu při odtržení		
Úhel měření [°]	Podélný	Příčný	Podélný	Příčný	Podélný	Příčný	Podélný	Příčný	Podélný	Příčný	Podélný	Příčný
Pohled	3	5	10	3	5	10	3	5	10	3	5	10
Velikost kapky [μl]	3	5	10	3	5	10	3	5	10	3	5	10
Měření 1	99,8	98	97,8	108,4	106,7	101,9	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se
Měření 2	102,4	96,7	96,5	103,1	106,6	97,2	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se
Měření 3	102,8	99,5	96,3	102,5	104,6	99,8	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se
Měření 4	100,9	101,2	96,8	110,2	103,2	100,4	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se
Měření 5	101,7	99,5	99,5	104,4	106,4	100,9	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se
Měření 6	99	101,5	97,3	106,3	105,7	98,5	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se
Měření 7	101,5	102,3	96,9	104,2	104,5	102,1						
Měření 8	101	103,1	97,2	103,5	103,8	102						
Měření 9	101,2	102,3	98	104,9	105,6	100,9						
Měření 10	99,9	97,3	99,1	107	102,4	105,3						
Průměr	101,02	100,14	97,54	105,2778	104,95	100,9	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se
Směrodatná odchylka	1,12	2,15	1,02	2,35	1,42	2,10						
Nesymetrie úhlu odtrnutí	Neodtrne se											
Nesymetrie kontaktního úhlu	4,25777778	4,81	3,36									
Rozdíl velikostí úhlů:												
mezi 3 a 5	0,88			0,33								
mezi 5 a 10	2,6			4,05								
mezi 3 a 10	3,48			4,38								

## Příloha 2 - Naměřené a vyhodnocené kontaktní úhly a úhly odtržení vzorků nerezových plechů

Tabulka 15- Kontaktní úhly a úhly odtržení plechu bez povrchové úpravy

Vzorek	Plech bez povrchové úpravy										Úhel náklonu při odtržení kapky		
	Kontaktní úhel Podélný					Příčný					Podélný	Příčný	
Úhel měření [°]	3	5	10	3	5	10	3	5	10	3	5	10	3
Pohled	3	5	10	3	5	10	3	5	10	3	5	10	3
Velikost kapky [μl]	3	5	10	3	5	10	3	5	10	3	5	10	3
Měření 1	81	77,9	74,4	86,3	80,4	81,6	81,6	80,4	81,6	81,6	80,4	81,6	Neodtrne se
Měření 2	83,7	82,8	70,5	82,5	82,9	80,7	82,5	82,9	80,7	82,5	82,9	80,7	Neodtrne se
Měření 3	88,1	81,8	80,7	84	84,9	80,4	84	84,9	80,7	84	84,9	80,4	Neodtrne se
Měření 4	89,8	83,1	75,4	80,9	84,2	80,2	80,9	84,2	75,4	80,9	84,2	80,2	Neodtrne se
Měření 5	84,9	84,1	78,7	83,1	80,3	77,4	83,1	80,3	78,7	83,1	80,3	77,4	Neodtrne se
Měření 6	91,3	84,8	79,9	87,7	77,7	76	87,7	77,7	79,9	87,7	77,7	76	Neodtrne se
Měření 7	87,6	77,1	81,1	86,7	82,7	78	86,7	82,7	81,1	86,7	82,7	78	Neodtrne se
Měření 8	78	81,8	78,7	92,9	78,7	77,9	78	81,8	78,7	92,9	78,7	77,9	Neodtrne se
Měření 9	87,4	76,3	75,5	86,6	84,4	76,8	86,6	84,4	75,5	86,6	84,4	76,8	Neodtrne se
Měření 10	83,5	79,3	78,6	91,9	80,2	74,8	91,9	80,2	78,6	91,9	80,2	74,8	Neodtrne se
Průměr	85,53	80,9	77,35	86,26	81,64	78,38	86,26	81,64	77,35	86,26	81,64	78,38	Neodtrne se
Směrodatná odchylka	3,89	2,88	3,16	3,69	2,39	2,13	3,69	2,39	3,16	3,69	2,39	2,13	Neodtrne se
Nesymetrie úhlu odtrhnutí	0,73	0,74	1,03										
Nesymetrie kontaktního úhlu													
Rozdíly velikosti úhlů:													
mezi 3 a 5	4,63			4,62									
mezi 5 a 10	3,55			3,26									
mezi 3 a 10	8,18			7,88									

**Tabulka 16-** Kontaktní úhly a úhly odtržení plechu s podélným směrem struktury

Vzorek	Plech s podélným směrem struktury										Úhel náklonu při odtržení kapky	
	Kontaktní úhel					Příčný					Podélný	Příčný
Úhel měření [°]	Podélný	3	5	10	3	5	10	3	5	10	3	3
Pohled												
Velikost kapky [μl]												
Měření 1		148,7	149,3	145,9	152,8	149,9	150,1	149,9	150,1	150,1	3	3
Měření 2		148,2	150,4	144,2	151,6	150,4	144,8	150,4	150,4	144,8	2,5	3
Měření 3		148,1	146,3	148,7	148,3	153,1	147	148,3	153,1	147	3,5	4
Měření 4		147,3	146,9	145,4	152,3	150,8	146,9	150,8	150,8	146,9	3	4
Měření 5		148,3	146,5	147,4	150,8	150,9	147,5	150,8	150,9	147,5	2,5	3,5
Měření 6		149,5	150	144,7	151,5	148,2	148	151,5	148,2	148	3,5	4
Měření 7		150,2	147,9	147,8	150,4	150	147,6	150,4	150	147,6		
Měření 8		148,2	149,4	147,2	149,5	147,8	147,8	149,5	147,8	147,8		
Měření 9		148,8	149,2	145,4	147,5	149	147,9	147,5	149	147,9		
Měření 10		150,3	148,5	148,8	149,8	150,1	146,5	149,8	150,1	146,5		
Průměr		148,76	148,44	146,55	150,45	150,02	147,41	150,45	150,02	147,41	3	3,58
Směrodatná odchylka		0,92	1,40	1,56	1,62	1,43	1,27	1,62	1,43	1,27		
Nesymetrie úhlu odtrhnutí		1,69	1,58	0,86							0,58	
Nesymetrie kontaktního úhlu												
Rozdíly velikosti úhlů:												
mezi 3 a 5		0,32			0,43							
mezi 5 a 10		1,89			2,61							
mezi 3 a 10		2,21			3,04							

Tabulka 17 - Kontaktní úhly a úhly odtržení plechu s příčným směrem struktury

Vzorek	Plech s příčným směrem struktury										Úhel náklonu při odtržení kapky			
	Kontaktní úhel Podélný					Příčný					Podélný	Příčný		
Úhel měření [°]	3	5	10	3	5	10	3	5	10	3	5	10	3	3
Pohled														
Velikost kapky [μl]														
Měření 1	152,3	151,5	148,4	151,2	150,6	143,3	152,3	151,5	148,4	151,2	150,6	143,3	4	3,5
Měření 2	152,3	152,8	148,5	147,8	152,8	147,6	152,3	152,8	148,5	147,8	152,8	147,6	4	3
Měření 3	153,7	153,5	149,2	148,6	147,5	148,9	153,7	153,5	149,2	148,6	147,5	148,9	3	3
Měření 4	149,4	149,3	147,5	151	149,1	145,6	149,4	149,3	147,5	151	149,1	145,6	4	3,5
Měření 5	150,4	149,6	147,3	148,2	150,5	149,5	150,4	149,6	147,3	148,2	150,5	149,5	4	3,5
Měření 6	150,6	149,4	147,8	150,3	150,2	148,7	150,6	149,4	147,8	150,3	150,2	148,7	3	3
Měření 7	151,4	153,7	148,4	152,7	147,2	149,3	151,4	153,7	148,4	152,7	147,2	149,3		
Měření 8	156,6	151	148,8	151	151,7	146,2	156,6	151	148,8	151	151,7	146,2		
Měření 9	151,3	151,7	149,5	151,6	148,9	149,4	151,3	151,7	149,5	151,6	148,9	149,4		
Měření 10	150,5	151,5	148,4	150,2	149,6	148	150,5	151,5	148,4	150,2	149,6	148		
Průměr	151,85	151,4	148,38	150,2667	149,81	147,65	151,85	151,4	148,38	150,2667	149,81	147,65	3,67	3,25
Směrodatná odchylka	1,96	1,54	0,66	1,51	1,65	1,93	1,96	1,54	0,66	1,51	1,65	1,93		
Nesymetrie úhlu odtrhnutí														
Nesymetrie kontaktního úhlu	1,58	1,59	0,73											0,42
Rozdíl velikosti úhlů:														
mezi 3 a 5	0,45													0,46
mezi 5 a 10	3,02													2,16
mezi 3 a 10	3,47													2,62



**Tabulka 18 - Kontaktní úhly a úhly odtržení plechu s příčným i podélným směrem struktury**

Vzorek	Plech s příčným i podélným směrem struktury										Úhel náklonu při odtržení kapky	
	Kontaktní úhel					Příčný					Podélný	Příčný
Úhel měření [°]	Podélný	3	5	10	3	5	10	3	5	10	3	3
Pohled												
Velikost kapky [μl]												
Měření 1		139,4	138,3	137,2	141,7	139,1	142,2				4	4
Měření 2		140,5	140,6	138,6	139,9	139,9	138,4				3,5	4
Měření 3		140,1	137,8	140,6	141,1	140,5	139,2				3,5	4,5
Měření 4		138,9	139,9	140	141,7	140,4	138,1				5	3
Měření 5		140,6	139,9	141,7	143,5	142,3	140,8				4	4,5
Měření 6		140,6	141,9	138,6	143,1	139,4	140				4	4
Měření 7		141,3	140,2	139,1	140,4	143,3	140,3					
Měření 8		140,7	139,3	139,7	141	141,2	141,7					
Měření 9		140	139,8	138,6	141,8	140,8	139,4					
Měření 10		139,1	139,7	140,8	141,2	139,9	139					
Průměr		140,12	139,74	139,49	141,54	140,68	139,91				4	4
Směrodatná odchylka		0,73	1,08	1,26	1,05	1,23	1,29					
Nesymetrie úhlu odtrhnutí		1,42	0,94	0,42								0,00
Nesymetrie kontaktního úhlu												
Rozdíly velikosti úhlů:												
mezi 3 a 5		0,38			0,86							
mezi 5 a 10		0,25			0,77							
mezi 3 a 10		0,63			1,63							

### Příloha 3 - Naměřené a vyhodnocené kontaktní úhly a úhly odtržení polypropylenových vzorků

*Tabulka 19 - Kontaktní úhly a úhly odtržení plastu bez povrchové úpravy*

Vzorek	Plast bez povrchové úpravy									
	Kontaktní úhel					Úhel náklonu při odtržení kapky				
Úhel měření [°]	Podélný		Příčný			Podélný		Příčný		
Pohled	3	5	10	3	5	10	3	5	10	3
Velikost kapky [μl]	3	5	10	3	5	10	3	5	10	3
Měření 1	91,8	90,3	90,5	91,4	87,9	85,5	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se
Měření 2	87,5	95,8	88,4	90,5	89,3	91	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se
Měření 3	92,9	86,4	91	92,2	87,1	91,5	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se
Měření 4	91,8	87,3	86,6	90,4	90,7	89,2	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se
Měření 5	89,3	84,5	87,4	93,6	91,6	90,7	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se
Měření 6	89,1	91,6	86,6	89,6	91,6	88,2	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se
Měření 7	86,4	89,5	87,1	89,9	91,1	89,9	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se
Měření 8	84,3	91,8	89,5	88,1	91,8	90,3	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se
Měření 9	92,2	87,6	88,9	92,3	90,2	86,8	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se
Měření 10	90	88,8	86,4	88,2	91,1	88,2	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se
Průměr	89,53	89,36	88,24	90,62	90,24	89,13	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se
Směrodatná odchylka	2,66	3,06	1,60	1,69	1,55	1,84	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se
Nesymetrie úhlu odtrhnutí	1,09	0,88	0,89				Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se
Nesymetrie kontaktního úhlu							Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se	Neodtrne se
Rozdíl velikosti úhlů:										
mezi 3 a 5	0,17			0,38						
mezi 5 a 10	1,12			1,11						
mezi 3 a 10	1,29			1,49						

**Tabulka 20 - Kontaktní úhly a úhly odtržení plastu s příčným směrem struktury**

Vzorek	Plast s příčným směrem struktury									
	Kontaktní úhel					Úhel náklonu při odtržení				
Úhel měření [°]	Podélný		Příčný			Podélný		Příčný		
Pohled	3	5	10	3	5	10	3	5	10	3
Velikost kapky [μl]	3	5	10	3	5	10	3	5	10	3
Měření 1	154,2	153,1	152,5	152,5	155,7	153,8	153,8	155,7	153,8	4
Měření 2	155,2	156,1	152,2	155,2	149,6	149,9	149,9	149,6	149,9	5
Měření 3	155,7	156,6	151,8	152,1	154,4	151,6	151,6	154,4	151,6	3,5
Měření 4	154,6	152	153,6	152,3	153,3	151,7	151,7	153,3	151,7	4
Měření 5	155,6	154,6	152,3	153,8	151,5	148,8	148,8	151,5	148,8	4,5
Měření 6	157,3	152,4	152,1	152,5	152,2	153,1	153,1	152,2	153,1	4
Měření 7	154,9	154,1	149,8	154,5	154,3	147,7	147,7	154,3	147,7	
Měření 8	152,8	156,6	149,5	153,3	152,2	146,3	146,3	152,2	146,3	
Měření 9	153,9	155,5	154,1	154,8	153,1	150,8	150,8	154,8	150,8	
Měření 10	154,5	152,2	149,1	152,1	152,5	150,5	150,5	152,5	150,5	
Průměr	154,87	154,32	151,7	153,31	152,88	150,42	150,42	152,88	150,42	4,75
Směrodatná odchylka	1,15	1,74	1,61	1,13	1,62	2,21	2,21	1,62	2,21	
Nesymetrie úhlu odtrhnutí	1,56	1,44	1,28							0,58
Nesymetrie kontaktního úhlu										
Rozdíl velikosti úhlů:										
mezi 3 a 5	0,55			0,43						
mezi 5 a 10	2,62			2,46						
mezi 3 a 10	3,17			2,89						

Tabulka 21 - Kontaktní úhly a úhly odtržení plastu s podélným směrem struktury

Vzorek	Plast s podélným směrem struktury										Úhel náklonu při odtržení kapky		
	Kontaktní úhel Podélný					Příčný					Podélný	Příčný	
Úhel měření [°]	3	5	10	3	5	10	3	5	10	3	5	3	3
Pohled													
Velikost kapky [μl]													
Měření 1	149	149,6	149,3	151,6	152,8	150,1						5	3,5
Měření 2	152	150,8	146,5	152,4	151,4	146,3						4	4
Měření 3	150	146,4	150,1	150,4	150,2	150,4						4	3
Měření 4	148,8	148,5	148,8	150,8	151,6	146,4						4	3
Měření 5	147,9	147,3	148,3	154	150,5	152,4						3,5	5
Měření 6	149,7	151,5	146,4	153,2	152,3	147,2						6	4
Měření 7	150,3	149	146	152,5	152,5	150,8							
Měření 8	150,8	149,8	147,4	150,2	151,1	148,4							
Měření 9	148	151,3	147,6	151	149,9	151,2							
Měření 10	150,7	149,3	147	152,3	151,9	146,3							
Průměr	149,72	149,35	147,74	151,84	151,42	148,95						4,416666667	3,75
Směrodatná odchylka	1,24	1,57	1,28	1,19	0,94	2,18							
Nesymetrie úhlu odtržení													
Nesymetrie kontaktního úhlu	2,12	2,07	1,21										0,67
Rozdíl velikosti úhlů:													
mezi 3 a 5	0,37			0,42									
mezi 5 a 10	1,61			2,47									
mezi 3 a 10	1,98			2,89									

**Tabulka 22 - Kontaktní úhly a úhly odtržení plastu s příčným i podélným směrem struktury**

Vzorek	Plast s příčným i podélným směrem struktury										Úhel náklonu při odtržení kapky		
	Kontaktní úhel					Příčný					Podélný	Příčný	
Úhel měření [°]	Podélný	3	5	10	3	5	10	145,5	145,8	146,3	146,1	3	3
Pohled													
Velikost kapky [μl]													
Měření 1	149,4	147,1	147,1	145,5	145,8	146,3	146,1	146,3	146,3	146,3	146,1	3	4
Měření 2	149,1	147,3	147,3	144,3	149,4	147,3	143,5	149,4	147,3	147,3	143,5	4	5
Měření 3	147,6	146,9	146,9	143,5	147	147,3	147,7	147,3	147,3	147,3	147,7	4	3
Měření 4	149,3	148,6	148,6	142,3	148,7	148,3	146,8	148,7	148,3	148,3	146,8	3	3
Měření 5	146,3	146,3	146,3	142,1	146,7	147,9	145,7	146,7	147,9	147,9	145,7	3	3
Měření 6	147	146,5	146,5	143,1	147,7	146	147,2	147,7	147,7	146	147,2	5	3
Měření 7	148,5	146,8	146,8	144,9	148,1	147,6	144,8	144,9	148,1	147,6	144,8		
Měření 8	150,6	149,1	149,1	143,8	147,1	147,5	144,2	143,8	147,1	147,5	144,2		
Měření 9	148,6	145,2	145,2	144,9	146,4	143,7	146,2	144,9	146,4	143,7	146,2		
Měření 10	144,9	147,1	147,1	145,3	147,2	144,9	146,7	145,3	147,2	144,9	146,7		
Průměr	148,13	147,09	147,09	143,97	147,41	146,68	145,89	143,97	147,41	146,68	145,89	3,67	3,5
Směrodatná odchylka	1,60	1,05	1,05	1,15	1,03	1,38	1,28	1,15	1,03	1,38	1,28		
Nesymetrie úhlu odtrhnutí													
Nesymetrie kontaktního úhlu	0,72	0,41	0,41	1,92									0,17
Rozdíly velikosti úhlů:													
mezi 3 a 5	1,04				0,73								
mezi 5 a 10	3,12				0,79								
mezi 3 a 10	4,16				1,52								

## Příloha 4 - Souhrnné vyhodnocení vzorků

Tabulka 23 - Souhrnné vyhodnocení vzorků

Souhrnné vyhodnocení vzorků		Letecké plechy	Povlakované povrchy	Pouze povlakované plechy	Pouze povlakované plasty	Plech bez povrchové úpravy	Plast bez povrchové úpravy
Průměrná nesymetrie kontaktního úhlu [°]:							
Pro velikost kapky 3 $\mu\text{l}$		2,57	1,52	1,56	1,47	0,73	1,09
Pro velikost kapky 5 $\mu\text{l}$		2,99	1,15	1,37	1,31	0,74	0,88
Pro velikost kapky 10 $\mu\text{l}$		2,91	1,07	0,67	1,47	1,03	0,89
Průměrný rozdíl velikosti úhlů [°]:							
mezi 3 a 5		0,67	0,54	0,48	0,59	4,63	0,275
mezi 5 a 10		1,75	1,98	1,53	2,18	3,405	1,115
mezi 3 a 10		2,71	2,52	2,27	2,77	8,03	1,39
Rozdíl úhlu odtržení [°]:							
Jednosměrné struktury			0,56	0,50	0,63		
Vzájemně kolmé struktury			0,08	0,00	0,17		
Bez definované struktury		Neodtrhne se				Neodtrhne se	Neodtrhne se