

# Měření povrchového napětí UV vytvrditelných laků

Michaela Balharová

---

Bakalářská práce  
2021

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Akademický rok: 2020/2021

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Michaela Balharová**  
Osobní číslo: **T17037**  
Studijní program: **B2808 Chemie a technologie materiálů**  
Studijní obor: **Materiálové inženýrství**  
Forma studia: **Prezenční**  
Téma práce: **Měření povrchového napětí roztoků UV vytvrditelného laku**

### Zásady pro vypracování

1. Vypracovat rešerši zabývající se problematikou procesu lakování ve vertikálním směru, UV vytvrditelných laků a možnostmi stanovení povrchového napětí roztoků.
2. Provést základní experimenty měření povrchového napětí Wilhelmyho metodou a metodou visící kapky v závislosti na koncentraci použitých rozpouštědel a teplotě.
3. Diskutovat vliv koncentrace použitých rozpouštědel a teploty na povrchové napětí UV vytvrditelného laku.
4. Zhodnotit vliv výše zmíněných parametrů na proces lakování.

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Ebnesajjad, S. — Surface Tension and Its Measurement. Handbook of Adhesives and Surface Preparation. S. Ebnesajjad. 2011: Oxford, William Andrew Publishing.
2. Butt, H.J., K. Graf, and M. Kappel, Physics and Chemistry of Interfaces. 2006: Wiley.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lenka Musilová, Ph.D.**  
Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **31. prosince 2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **21. května 2021**

L.S.

---

**prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.**  
děkan

---

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

Ve Zlíně dne 20. května 2021

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

### **Prohlašuji,**

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

V rámci bakalářské práce bylo charakterizováno chování UV vytvrditelného laku na akrylátové bázi s rozpouštědly v různých poměrech. V teoretické části je zpracován přehled o povrchovém napětí a o použitých metodách měření. Dále jsou zde popsány UV vytvrditelné laky na akrylátové bázi, přičemž je zde popsána i charakteristika technologického procesu lakování, která je používána v praxi právě s námi použitým lakem. V praktické části byla stanovena rychlost odpařování rozpouštědel v lakovací směsi, aby bylo zjištěno, které rozpouštědlo má jakou funkci v lakovací směsi. Dále bylo stanoveno povrchové napětí Wilhelmyho metodou a metodou visící kapky, které poskytují informace o chování směsi při různých koncentracích rozpouštědel a laku.

Klíčová slova: UV vytvrditelný lak, povrchové napětí, Wilhelmy metoda, visící kapka, IPL vrstva, odpařování

## **ABSTRACT**

The main goal of this bachelor thesis is mainly to characterize the properties and behavior of UV curable acrylate-based lacquer. To find the ideal ratio of lacquer to solvent mixture, the physical properties of the individual mixtures were characterized by Wilhelmy plate and pendant drop measurement and determination evaporation rate.

Key words: UV curable lacquer, surface tension Wilhelmy plate method, pendant drop, IPL layer, evaporation rate

Děkuji své vedoucí paní Ing. Lence Musilové, Ph.D. za odborné vedení práce, rady a velkou vstřícnost při vypracování bakalářské práce. Dále bych ráda poděkovala své rodině za morální podporu v průběhu studia.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD.....</b>	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>10</b>
<b>1 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY.....</b>	<b>11</b>
1.1 NEŽÁDOUCÍ DEFEKTY .....	11
1.1.1 Nedostatečné rozlévání laku .....	11
1.1.2 Nehomogenita lakované vrstvy.....	11
1.1.3 Nedostatečná IPL vrstva .....	12
<b>2 UV VYTVRDITELNÉ LAKY .....</b>	<b>14</b>
2.1 ROZDĚLENÍ AKRYLÁTOVÝCH UV LAKŮ .....	14
2.2 SLOŽENÍ UV VYTVRDITELNÝCH LAKŮ .....	15
2.3 VÝHODY A NEVÝHODY UV VYTVRDITELNÝCH LAKŮ.....	16
2.4 ROZPOUŠTĚDLA.....	16
<b>3 TECHNOLOGIE NANÁŠENÍ LAKU .....</b>	<b>19</b>
3.1 NANÁŠENÍ LAKU MÁČENÍM .....	19
3.2 NANÁŠENÍ LAKU POLÉVÁNÍM .....	20
3.3 NANÁŠENÍ LAKU CLONOU.....	21
3.5 INTERPENETRAČNÍ VRSTVA (IPL).....	23
<b>4 POVRCHOVÉ NAPĚTÍ.....</b>	<b>25</b>
4.2 METODA VISÍCÍ KAPKY .....	27
4.3 WILHELMYHO METODA .....	28
4.3.1 Závislost povrchového napětí na teplotě.....	29
4.3.2 Závislost povrchového napětí na koncentraci .....	30
4.4 STANOVENÍ RYCHLOSTI ODPAŘOVÁNÍ.....	31
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>32</b>
<b>5 PŘÍPRAVA VZORKŮ LAKOVACÍCH SMĚSÍ .....</b>	<b>33</b>
5.1 PŘÍPRAVA VZORKŮ PRO MĚŘENÍ .....	33
<b>6 POUŽITÉ MATERIÁLY A MĚŘICÍ METODY .....</b>	<b>34</b>
6.1 POUŽITÉ PŘÍSTROJE .....	34
6.2 POUŽITÉ MATERIÁLY .....	34
6.3 METODA VISÍCÍ KAPKY .....	35
6.4 WILHELMYHO METODA .....	36
6.5 STANOVENÍ RYCHLOSTI ODPAŘOVÁNÍ.....	37
<b>7 VÝSLEDKY A DISKUSE .....</b>	<b>38</b>
7.1 POMĚR ŘEDĚNÍ 40 HM. % LAKU : 60 HM. % ROZPOUŠTĚDLA .....	38

7.1.1	Stanovení rychlosti odpařování.....	38
7.1.2	Stanovení povrchového napětí tenziometricky .....	40
7.1.3	Stanovení povrchového napětí goniometricky .....	41
7.2	POMĚR ŘEDĚNÍ 72 HM. % LAKU : 28 HM. % ROZPOUŠTĚDLA .....	41
7.2.1	Stanovení rychlosti odpařování.....	42
7.2.2	Stanovení povrchového napětí tenziometricky .....	43
7.2.3	Stanovení povrchového napětí goniometricky .....	45
<b>ZÁVĚR .....</b>		<b>47</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>		<b>48</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>		<b>52</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>		<b>53</b>
<b>SEZNAM ROVNIC .....</b>		<b>54</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>		<b>55</b>



## ÚVOD

S UV vytvrditelnými laky se setkáváme stále více a více. Jedná se o mokrou povrchovou úpravu, která se využívá v mnoha aplikacích. V jejich aplikacích se klade důraz hlavně na mechanické vlastnosti jako je otěru a oděru vzdornost, UV stabilita, odolnost proti povětrnostním podmínkám aj. V běžném životě se s nimi můžeme setkat u dílů na automobilech, u krytů venkovních bazénů, či zástěn sprchových koutů.

K výhodám UV vytvrditelných laků patří ekonomické výhody z hlediska úspory energie, díky obvykle rychlému vytvrzování při pokojové teplotě, možnost okamžitého zpracování po vytvrzení, z hlediska ekologického možnost snadné recyklace a tím nízká produkce odpadu, úspora energie díky použití UV záření. K dalším výhodám patří všestranné aplikace, vysoká odolnost vytvrzeného laku proti poškrábání či chemikáliím, odolnost proti oděru a lepší houževnatost. K nevýhodám patří vyšší materiálové náklady, než je tomu např. u alkydů, polyesterů či epoxidů, citlivost na vlhkost či obtížnější vytvrzování pigmentových povlaků u tloušťky vyšší než 5  $\mu\text{m}$ .

Díky vysokým nárokům na mechanické vlastnosti se často setkáváme i s kazi na lakovaných výrobcích. Tyto vady mohou být způsobeny nedostatečnou interpenetrační vrstvou, nerovnoměrným plošným pokrytím laku, pomerančovou kůrou, žloutnutím nebo odlupováním nátěru. Vady mohou být způsobeny špatnou povrchovou úpravou substrátu před samotným lakováním nebo nevhodně zvolenými parametry lakovací směsi. [2, 4, 8, 20]

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

### 1.1 Nežádoucí defekty

V průběhu lakování může docházet ke vzniku nežádoucích defektů. Tyto defekty mohou mít různé příčiny. Projevy vadného lakování mohou být: povislá vrstva (sagging), praskání (cracking), kvetení (bloomig), dírky (pinholes), puchýře (blisters), efekt pomerančové kůry (orange peel), odlupování (flaking/ peeling), žloutnutí a nerovnoměrná vrstva laku. [4]

#### 1.1.1 Nedostatečné rozlévání laku

Nedostatečné rozlévání laku na povrchu desky se může projevit jako „sagging“. Tato vada vzniká stékáním laku při nerovnoměrném nanášení, nebo příliš vysokou viskozitou laku. Při lakování velkoplošných desek se může objevit u spodní hrany. Svým vzhledem připomíná záclony, odtud její název „curtaining“.

Tomuto defektu můžeme předejít vhodně zvolenou technologií nanášení laku nebo optimalizováním lakovací směsi, tedy snížením viskozity pomocí vhodně zvolených poměrů ředidel. [4]



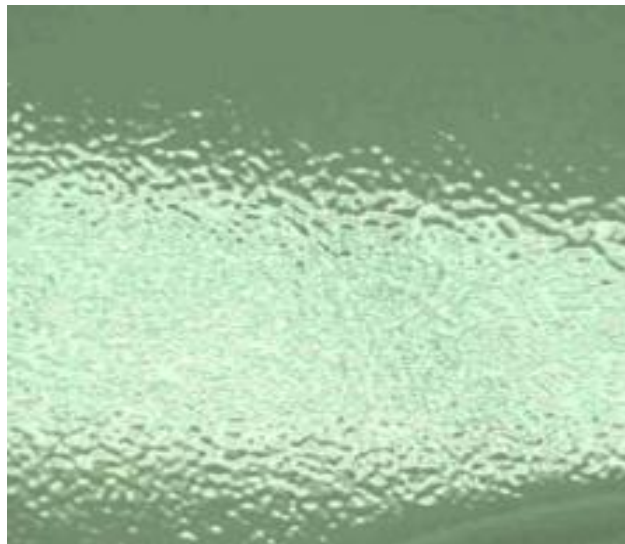
Obrázek 1: Defekt sagging[5]

#### 1.1.2 Nehomogenita lakované vrstvy

Nehomogenita lakované vrstvy se může projevovat rozdílnou tloušťkou laku na celé ploše desky nebo jako „orange peel“. Defekt orange peel si získal svůj název díky vzhledové podobnosti s pomerančovou kůrou. Tato vada může být způsobena nevhodnými

rozpouštědly, jejich nevhodným poměrem v lakovací směsi nebo nevhodnou technologií nanášení laku.

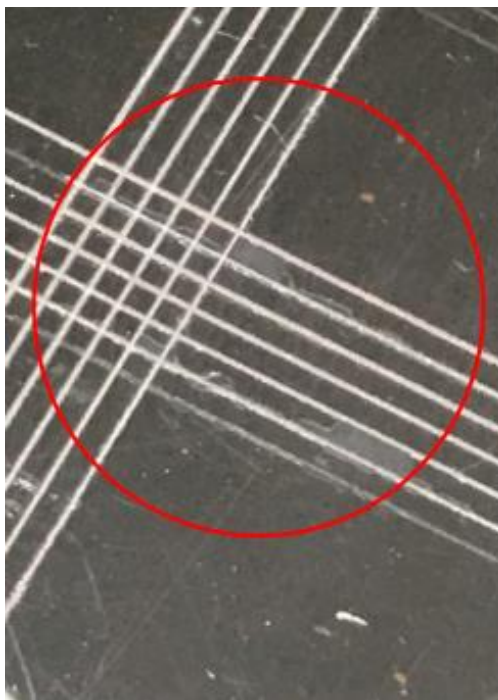
Rozdílná tloušťka laku na ploše lakované desky může být způsobena také nevhodně zvolenými rozpouštědly, jejich poměrem nebo nevhodnou technologií nanášení lakovací směsi. [4]



Obrázek 2: Defekt orange peel [6]

### 1.1.3 Nedostatečná IPL vrstva

Projevem nedostatečné interpenetrační vrstvy je „flaking“. U této vady pozorujeme odlupování vrstvy laku při mechanickém namáhání. Tento projev může být způsoben příliš vysokou nebo naopak nízkou interpenetrační vrstvou. Tuto vrstvu ovlivníme optimalizováním složení lakovací směsi a časem pro odpařování rozpouštědel. [2]



Obrázek 3: Defekt nedostatečné IPL vrstvy

## 2 UV VYTVRDITELNÉ LAKY

UV vytvrditelné laky jsou nátěrové systémy, které jsou tvrzené ultrafialovým zářením. Díky svým výhodám nabývají na popularitě, a to hlavně kvůli kombinacím ekologických vlastností a ekonomičnosti. V průmyslu se UV vytvrditelné laky nejprve rozšířily v dřevařském a grafickém průmyslu.

Obvykle laky neobsahují organická rozpouštědla kvůli nepříznivému vlivu na životní prostředí. Práškové a UV vytvrditelné laky patří k neekologičtějším variantám lakovacích systémů. Rozpouštědla se přidávají do lakovacích směsí hlavně k získání nižší viskozity.

Laky vytvrditelné UV zářením využívají energii zdrojů záření v oblasti s kratšími vlnovými délkami elektromagnetického spektra. Díky tomu jsou schopné vytvořit volné radikály inicující rychlou řetězovou reakci. Elektromagnetické spektrum se dělí do oblastí infračerveného, viditelného a ultrafialového záření, přičemž se využívá hlavně oblast ultrafialového záření. UV oblast se dále dělí na UV-A, UV-B a UV-C záření.

Důležitou složkou laku jsou fotoinicátory, které vyvolávají chemickou reakci v laku. Nejprve dojde k adsorbci ultrafialového záření dané délky, dojde k rozpadu a tím i ke vzniku energie. Vzniklé radikály reagují s monomery a oligomery akrylu. U této reakce dochází k okamžitému vytvoření síťové struktury molekul, které se změny z kapalné na pevnou.

Doba vytvrzování UV laků se pohybuje v sekundách. S nalakovanými díly lze ihned po vytvrzení manipulovat. Rychlost schnutí však závisí na výkonu, délce, ale i počtu zářičů a vzdálenosti nalakovaných desek. Existují dva mechanismy pro vytvrzování: radikálový a kationtový. Užívanějším typem je radikálový mechanismus. [27, 28, 33]

### 2.1 Rozdělení akrylátových UV laků

Suroviny využívající principu UV vytvrzování se skládají z molekul o nízké hmotnosti. Hlavní typy pryskyřic jsou radikálově polymerizovatelné nenasycené polyestery, akryláty ukončené molekulami jako např. polyepoxydy, polyestery, polyethery, polyuretany a vinylery. Jelikož většina pryskyřic má velmi vysokou viskozitu, ředí se reaktivními rozpouštědly, aby došlo ke snížení celkové viskozity roztoku.

Mezi hlavní typy pryskyřic patří akrylátové epoxydy, akrylátové uretany a akrylátové polyestery. [33]

### **2.1.1.1 Epoxidové akryláty**

Epoxidové akryláty jsou nejpoužívanější oligomery v průmyslu při UV vytvrzování. Jejich oblíbenost při aplikacích je díky vysoké reaktivitě, chemické odolnosti, vysoké tepelné stabilitě, rychlému vytvrzení, a poskytnutím lesku nátěrům, inkoustům při potisku papíru, lepidlům a tmelům. Kromě spousty výhod mají i nevýhody mezi něž patří žloutnutí, vysoká viskozita nebo špatná adheze. Kvůli vysoké viskozitě se do lakovacích směsí se přidávají reaktivní ředidla. [31, 32, 33]

### **2.1.1.2 Uretan akryláty**

Uretan akryláty se vyznačují velmi vysokou tvrdostí vytvrzeného nátěru, chemickou a teplotní odolností, dobrou reaktivitou a rychlým vytvrzováním. Naopak jejich náklady jsou vyšší. Své využití díky odolným vlastnostem nachází třeba u nátěrů podlahových krytin [32, 33]

### **2.1.1.3 Polyesterové akryláty**

Polyesterové akryláty se využívají s alifatickým a aromatickým uspořádáním v řetězci. Výhodou pro tyto akryláty jsou nízké náklady a využití aromatických a alifatických esterů. V těchto systémech je většinou nezbytné použití rozpouštědla pro získání nižší viskozity. Molekulová hmotnost je u polyesterových akrylátů v rozsahu 500 – 2000 g/mol. Aromatické polyesterové akryláty jsou chemicky odolné, velmi reaktivní, teplotně stabilní a odolné proti otěru. Alifatické polyesterové akryláty jsou velmi reaktivní, teplotně stabilní a chemicky odolné. [32, 33]

## **2.2 Složení UV vytvrditelných laků**

Základ vytvrditelných laků pomocí UV záření tvoří estery akrylových kyselin, např.: polyestery, polyethery, polyuretany, či epoxidy a vinylethery. Tyto monomery a oligomery tvoří podstatnou část samotného UV laku a to asi 90%. Od poměru akrylátových monomerů a oligomerů se pak odvíjí i viskozita těchto laků. Úkolem monomerů je snížení a viskozity, zatímco u oligomerů její zvýšení.

UV laky mohou být dále tvořeny aditivami, jakými jsou povrchově aktivní látky, vyrovnávací činidla, odpeňovače, regulátory průtoku, flexibilizátory, pigmenty, UV stabilizátory apod. Již zmíněné kluzké prostředky zajišťují dobrou kluznost vrstvy laku. Síťovací či rozlivové prostředky mají za úkol rychlé a rovnoměrné rozlití vrstvy laku na substrátu. [27, 33]

UV laky bývají obecně tvořeny pryskyřicemi o nízké molekulové hmotnosti v rozmezí 300 – 5000 g/mol. Typické UV vytvrditelné laky se skládají z oligomerů, monomerů působících jako ředidla, fotopolymerizačního iniciátoru, koiniciátoru a jiných přísad, jako jsou stabilizátory, antioxidanty, pigmenty a plastifikátory. Výsledná vytvrzená vrstva laku musí mít požadované vlastnosti, mezi které patří: lesk, odolnost proti poškrábání a otěru, odolnost proti povětrnostním podmínkám a UV záření. [26, 33]

### 2.3 Výhody a nevýhody UV vytvrditelných laků

Výhody použití UV laků jsou ekonomické, ekologické a procesní. Z ekonomického hlediska se jedná o úsporu energie, rychlosti vytvrzování, malých nároků na prostor a okamžitého zpracování po vytvrzení laku. K ekologickým výhodám patří: směsi bez rozpouštědel a snížení produkce odpadu díky recyklaci. Z pohledu procesu je výhodou nízkého zahřívání substrátu, všestranná aplikace, odolnost laku proti oděru a otěru, proti chemikáliím a vysoká trvanlivost výrobku.

K nevýhodám při použití UV laků patří vyšší náklady na materiál než u jiných nátěrových hmot, možná inhibice na povrchu kyslíkem, obtížné vytvrzování nátěru při vyšší tloušťce. [33]

### 2.4 Rozpouštědla

Rozpouštědla jsou součástí nátěrových hmot. Jako rozpouštědlo se označuje organická látka mající schopnost rozpouštět látky, tedy rovnoměrně v sobě rozptýlit částice jiných látek, za vzniku homogenní směsi – roztoku. Rozpouštědlo se vyznačuje jednotnými chemickými a fyzikálními vlastnostmi v celém objemu. Hlavní úkol rozpouštědla je převedení filmotvorné složky do roztoku. Filmotvorné látky jsou netěkavé organické látky se schopností vytvořit tuhý a souvislý film ihned po zaschnutí. V důsledku rozpouštění pojiva nedochází k jeho chemickým změnám. V lakovacích směsích se rozpouštědla využívají k získání přijatelných aplikačních a reologických vlastností.

Rozpouštědla také musí splnit požadavky pro dané použití. Při výběru se dbá na charakteristické vlastnosti jako je rozpouštěcí síla, těkavost, toxicita, hořlavost, stabilita nebo barva. [23]



## Dělení rozpouštědel

### Dělení na základě chemického složení:

- a) Alifatické uhlovodíky (extrakční benzin, lakový benzin)
- b) Aromatické uhlovodíky (benzen, toluen)
- c) Acetaly (1,3-dioxolan)
- d) Alkoholy (ethanol, butanol)
- e) Chlorované uhlovodíky (dichlormethan, dichlorethan)
- f) Estery (butylacetát, etylacetát)
- g) Glykolethery a jejich acetáty (ethylenglykol, butylglykol)
- h) Ketony (aceton, cyklohexan)
- i) A další.

### Dělení na základě teploty varu:

- a) Vysokovroucí (bod varu  $> 150\text{ °C}$ )
- b) Středněvroucí (bod varu  $100 - 150\text{ °C}$ )
- c) Nízkovroucí (bod varu  $< 100\text{ °C}$ )

### Dělení na základě odpařivosti: (standard – ether = 1)

- a) Snadno těkává rozpouštědla – číslo odpařivosti  $< 8$
- b) Středně těkává rozpouštědla – číslo odpařivosti  $8 - 15$
- c) Pomalu těkává rozpouštědla – číslo odpařivosti  $15 - 50$
- d) Těžce těkává rozpouštědla – číslo odpařivosti  $> 50$

### Dělení na základě bodu vzplanutí:

- a) Třída I: hořlaviny s bodem vzplanutí  $< 21\text{ °C}$
- b) Třída II: hořlaviny s bodem vzplanutí  $21 - 55\text{ °C}$

- c) Třída III: hořlaviny s bodem vzplanutí 55 – 100 °C
- d) Třída VI: hořlaviny s bodem vzplanutí 100 – 250 °C

Dělení na základě rozpouštěcích schopností:

- a) Pravá rozpouštědla – mají schopnost sami rozpustit filmotvornou látku
- b) Nepravá rozpouštědla – mají schopnost rozpouštět filmotvornou látku jen v přítomnosti pravého rozpouštědla; kombinací obou rozpouštědel dochází k úpravě viskozity na požadovanou hodnotu; vhodná kombinace pravého a nepravého rozpouštědla optimalizuje rozpouštění polymeru a rychlost odpařování rozpouštědel při tvorbě nátěru
- c) Ředidla – se používají k dalšímu ředění již hotových směsí před jejich použitím [20]

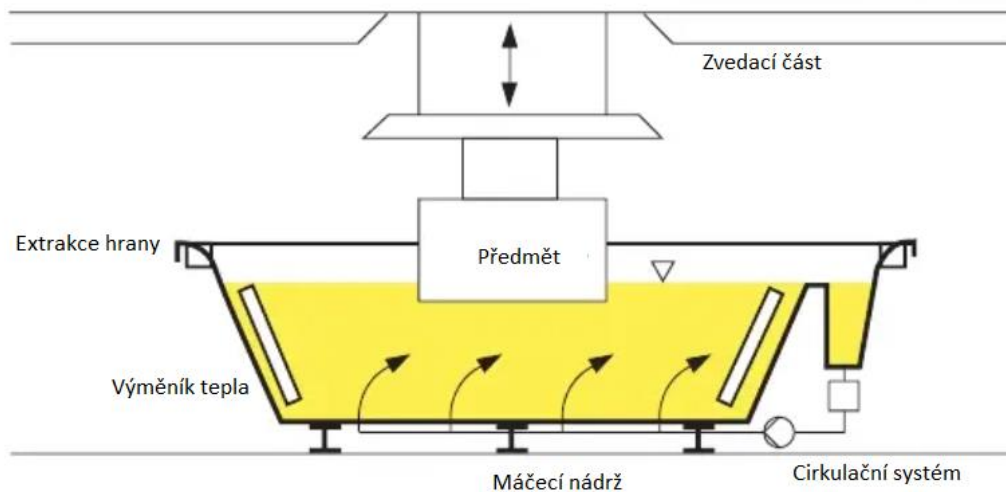
### 3 TECHNOLOGIE NANÁŠENÍ LAKU

K nejdůležitějším faktorům, které ovlivňují kvalitu a životnost nátěru na substrátu patří zejména vhodně zvolený technologický postup nanášení a vlastnosti podkladu. Je třeba brát v potaz i množství upravovaných vzorků, jejich velikost, tvar, členitost povrchu nebo vlivy, kterým bude nátěr vystaven. Technologie nanášení lakovacích směsí mohou být různé. Liší se také tím, zda je systém v kapalně nebo pevně (práškové) formě. Nanášení nátěru může probíhat ručně pomocí štětce, válečku nebo automatizovanými systémy, které buď aplikují lakovací směs na objekt přímo nebo přerušovaně např. pomocí nástřiků. Samotný substrát, na který je lak nanášen musí být citlivý na teplo. [1, 3]

#### 3.1 Nanášení laku máčením

Nanášení laku máčením neboli dip coating je jedna z nejjednodušších a nejstarších metod lakování v průmyslu. Výhodou je snadná automatizace procesu a nízká spotřeba materiálu oproti jiným lakovacím metodám. Při procesu se využívá adhezních vlastností lakovací směsi na substrátu. Proto je metoda méně vhodná pro předměty s členitým nebo průchozím povrchem (dutinami), kde by se lak nemusel rovnoměrně rozlít, či by se mohl naopak hromadit. Navzdory optimalizacím je zde problém s nerovnoměrnou tloušťkou laku. Pro konvekční máčení se mohou využívat směsi s rozpouštědly, nebo směsi vodou ředitelné.

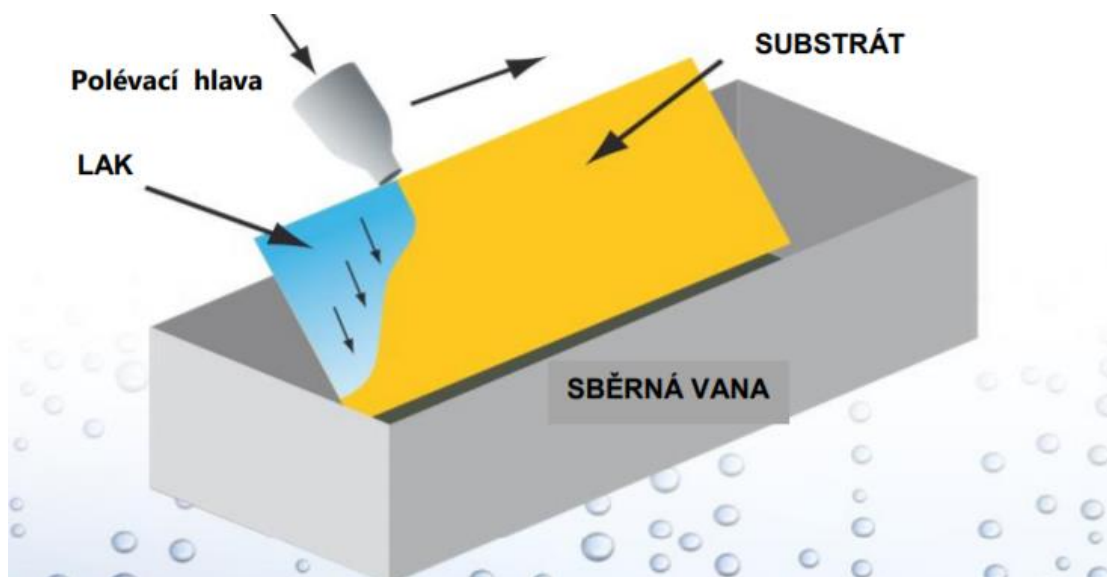
Při máčení se produkt ponoří do lakovací směsi s optimální viskozitou, poté je vytažen a odstaven kvůli odkapání přebytečné lakovací směsi a následně je dopraven do sušárny. Odkapávání a odpařování rozpouštědel trvá tak dlouho, aby nedocházelo k nežádoucím povrchovým vadám. Při sušení se využívá tepla, UV nebo IR záření k jeho urychlení a požadovanému vytvrzení laku. Jejich použití závisí na složení lakovací směsi. [1, 3]



Obrázek 4: Schéma procesu lakování máčením [1]

### 3.2 Nanášení laku poléváním

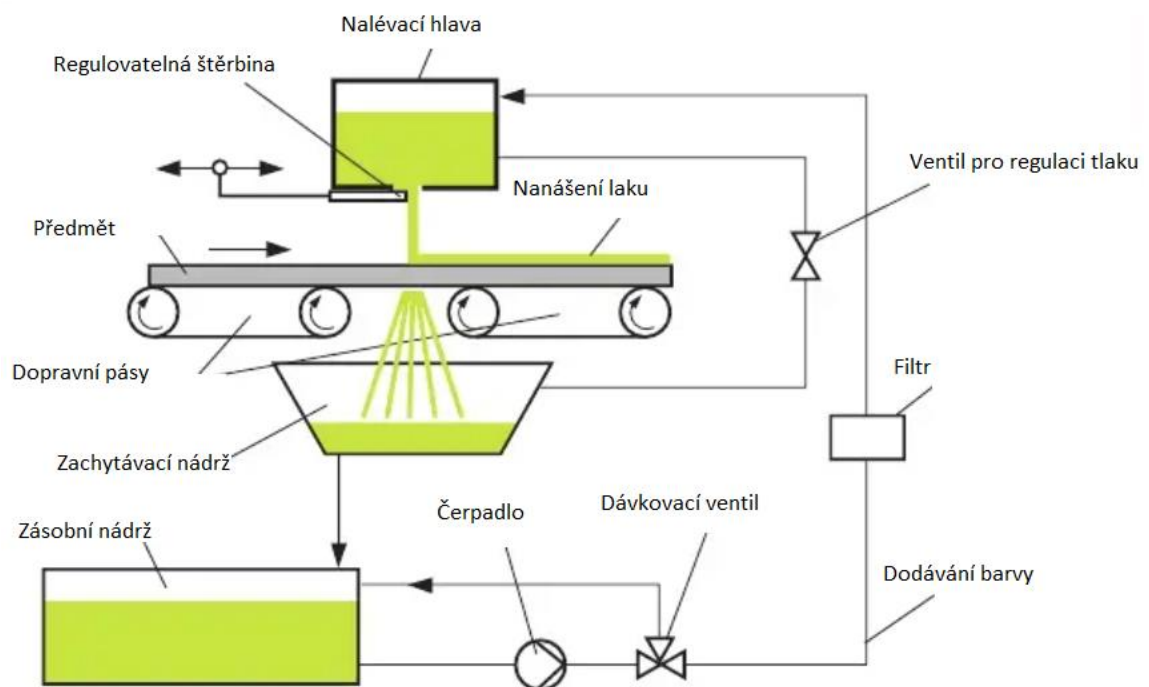
Technologie nanášení laku poléváním je vhodná pro sériové využití v průmyslu k lakování komponentů o velké ploše. K nanášení vrstvy laku na lakovanou desku se využívá gravitačního spádu. Lakovací směs je nanášena kontinuálně homogenním tokem laku skrze štěrbinu polévací hlavy. Komponent je pevně umístěn a v pohybu je polévací hlava, která opisuje dráhu určenou dle rozměrů lakované desky. Při polévání dochází k přetokům lakovací směsi, které se shromažďují ve sběrné vaně, následně se přefiltrují a znovu uvedou do oběhu. Tím nedochází ke zbytečným ztrátám laku. K nevýhodám této technologie patří možné nerovnoměrné rozlití laku v důsledku gravitace a delšího času cyklu. K vytvoření rovnoměrné vrstvy lakovací směsi musí být vhodně zvolený poměr rozpouštědel ve směsi. Obecně se tedy používají směsi s nižší viskozitou. [1, 2]



Obrázek 5: Schéma procesu lakování poléváním [2]

### 3.3 Nanášení laku clonou

Další metodou, která je vhodná pro větší a ploché komponenty je nanášení laku clonou. Lakovací směs se nanáší pomocí nalévací hlavy se štěrbinou na komponenty pohybující se na dopravních pásech. Lakovací směs je nanášena na lakovaný komponent clonou, a tak dochází k rovnoměrnému pokrytí lakovaného povrchu. Tloušťka filmu je dána viskozitou směsi, šířkou štěrbinu nalévací hlavy a rychlostí dopravníku s komponenty. Je-li clona širší, než je lakovaný komponent, vzniklé přetoky směsi se shromažďují, filtrují a vrací zpět do nalévací hlavy. Tímto způsobem nedochází k ulpívání přebytečného laku na komponentech a tím nedochází ke zbytečným ztrátám lakovací směsi. Technologie využívající nanášení laku clonou se uplatňují v odvětví zpracovávající dřevo, nábytek, v papírenském a obalovém průmyslu. Své využití nalézá také v průmyslu plastikářském či kovovém. [1, 3]

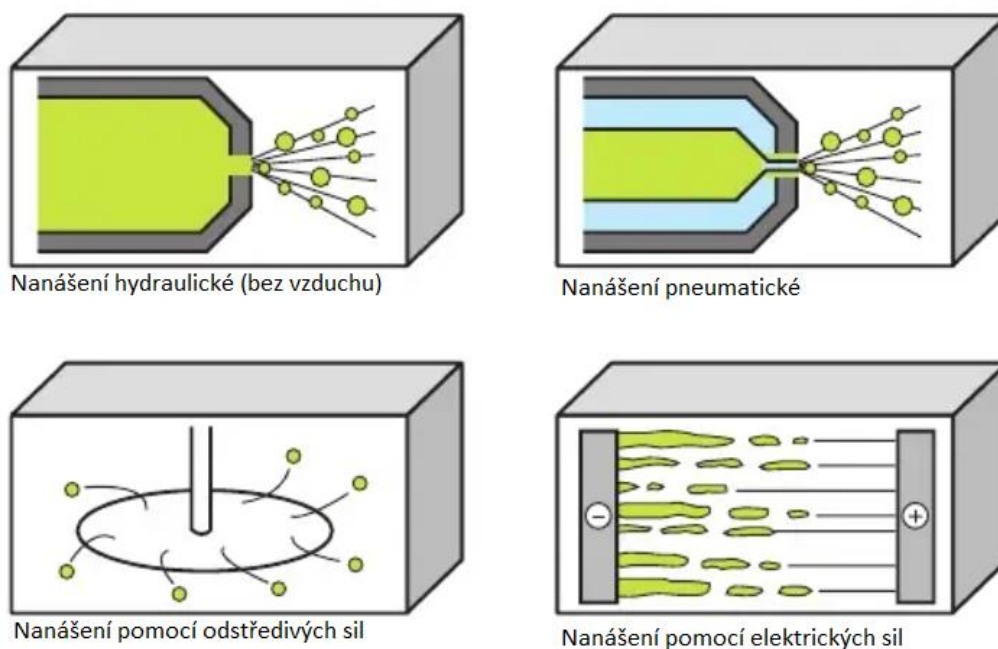


Obrázek 6: Schéma procesu lakování clonou [1]

### 3.4 Nanášení laku sprejováním

Další možností nanášení laku je na principu spreje. Tato technologie je založena na principu vzniku kapiček z kapalné směsi a následným vytvořením hladkého filmu na lakovaném komponentu. K vytvoření kapiček se využívá elektrické síly, odstředivých sil, zrychleného proudu vzduchu nebo lakovací směsi samotné. Pro tento proces je kromě rozprašovací hlavy také důležitá kabina. Při stříkání lakovací směsi vzniká oblak rozprašené směsi usazující se díky gravitaci. Kabina tedy musí být opatřena o vstupní systémy pro odsávání, oplach, separaci vzduchu a zařízení k dodávání a přepravě lakovací směsi a jeho přebytku.

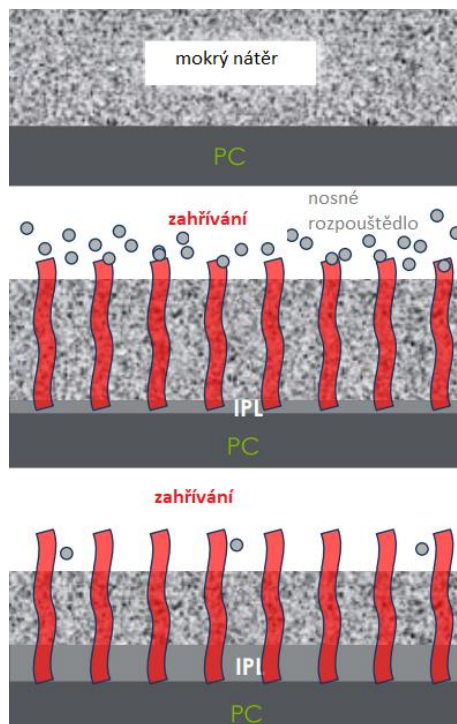
Aby bylo dosaženo požadovaného výsledku nanášením lakovací směsi, je zapotřebí použít kapičky o určité velikosti. Obvykle se používá velikost kapiček 30 – 35  $\mu\text{m}$ . Výhodou této technologie je lakování různě členitých komponentů. [1, 3]



Obrázek 7: Schéma metod nanášení laku pomocí atomizace [1]

### 3.5 Interpenetrační vrstva (IPL)

Lakované polymerní desky mají určité požadované vlastnosti jako například ořezuvzdornost, odolnost proti UV záření, poškrábání apod. Při lakování poléváním se na desky nanáší lakovací směs o požadované viskozitě, tedy o optimálním poměru rozpouštědel a čistého laku. IPL vrstva vzniká v odpařovací komoře, kde je účinnost a rychlost odpařování rozpouštědel ovlivněna časem, teplotou a množstvím ventilovaného vzduchu. Čas je zde důležitý pro vytvoření odpovídající přilnavosti k substrátu (desce). IPL vrstva se vytváří po odpaření nosného rozpouštědla, díky stálému zahřívání dochází k tzv. nabobtnání povrchu substrátu (vzájemnému proniknutí laku do substrátu). Jedná se tedy o mezivrstvu zajišťující odpovídající adhezi po vytvrzení laku. Nadměrně dlouhý nebo krátký čas může způsobit snížení adheze, kdy může dojít k oddělení lakované vrstvy od substrátu. Vytváření interpenetrační vrstvy schématicky popisuje obrázek č. 8. [2, 30]



Obrázek 8: Princip vzniku IPL vrstvy [30]



## 4 POVRCHOVÉ NAPĚTÍ

Povrchové napětí je příčinou jevu, při němž se povrch kapaliny chová jako pružná blána (tenký film na povrchu kapaliny). Pro napětí mezi dvěma kapalinami se běžně používá označení „interfaciální napětí“, zatímco označení „povrchové napětí“ je obecnější a běžně odkazuje na rozhraní mezi plynem a kapalinou. [9]

Vzniká tak, že molekuly kapaliny jsou z jedné strany obklopeny molekulami plynu nebo částicemi pevných látek a ze strany druhé molekulami kapalin. Mezimolekulové síly na obou stranách rozhraní kapaliny a jiné látky jsou většinou různě veliké. Díky tomu se síly, které působí na molekulu v povrchové vrstvě kapaliny nebudou shodovat se silami, které působí na molekulu uvnitř kapaliny. Přitažlivé síly drží pospolu molekuly v kapalině. Součet těchto sil v jakékoliv molekule kapaliny je v průměru nula. Kohézní síla na povrchové molekule je nenulová. Této síle je třeba vzdorovat, aby došlo ke zvětšení plochy povrchu; energie, která se tímto procesem spotřebuje, je nazývána povrchová energie. Nevyváženost sil na rozhraní (kapalina - plyn) způsobuje smrštění povrchu na minimum, proto kapalina zaujímá kulovitý tvar. [8]

Povrchová vrstva kapaliny je vrstva tvořící rozhraní mezi dvěma odlišnými fázemi. Její tloušťka bývá  $10^{-9} - 10^{-8}$  m.

Povrchové napětí  $\gamma$  se tedy definuje jako síla  $F$  v rovině povrchu, která působí na jednotku délky  $L$ , lze jej vyjádřit vztahem (1):

$$\gamma = \frac{F}{L} \quad (1)$$

Jednotka této veličiny je  $N \cdot m^{-1}$ , avšak se u praktických měření využívá jednotka  $mN \cdot m^{-1}$ . Rozměrově i číselně je rovno povrchové energii  $W$  vzaté na jednotku plochy, jako práce potřebná k izotermickému a reverzibilnímu zvětšení o jednotku plochy, což lze definovat vztahem (2):

$$\Delta E = W = \gamma \Delta S \quad (2)$$

V převážné míře povrchové napětí s rostoucí teplotou klesá, jelikož s rostoucí teplotou také klesá velikost přitažlivých sil mezi molekulami v kapalině.

Praktický příklad povrchového napětí lze vidět v přírodě u hmyzu pohybujícího se na vodní hladině (např. vodoměrka) nebo u drobných těles, která mají nižší hustotu než kapalina a nepotopí se, neprorazí – li tento pružný povrch. [7, 8, 10, 34]

## 4.1 Stanovení povrchového napětí

Standardní zkušební metody pro povrchové napětí a mezifázové napětí barev, rozpouštědel a roztoků povrchově aktivních látek popisuje norma ASTM D1331-44. Jedná se o normu popisující zkušební metody pro stanovení povrchového a mezifázového napětí tenziometricky. [12, 18]

Metody pro stanovení povrchového napětí se mohou dělit dle stavu povrchové vrstvy na metody statické, semistatické a dynamické.

### Statické metody

Tyto metody jsou založeny na sledování ustáleného rovnovážného stavu. Je zde možné získat reálné rovnovážné hodnoty povrchového napětí, což je velmi důležité při studiu roztoků. Koncentrace na rovnovážných rozhraních se zde liší od koncentrace ve fázi objemové, případně dochází i k orientaci molekul. Tyto děje potřebují dostatek času k ustanovení, ale u rychle se obnovujících povrchů není k tomuto dostatek času. Pokud se dosáhne rovnováhy, jsou hodnoty povrchového napětí nezávislé na čase.

### Semistatické

Semistatické metody jsou založeny na dosažení rovnovážného stavu soustavy jako je tomu u statických metod; avšak v tomto případě je rovnováha nestabilní. Při měření je nutno zvolit optimální rychlost, která je potřebná k přiblížení se rovnovážnému stavu. To je proto, aby měření nebyla příliš dlouhá, ale aby se zároveň zajistilo získání výsledkům blížících se reálným rovnovážným hodnotám.

### Dynamické

Metody dynamické se primárně využívají pro studium výrazně nerovnovážných stavů povrchových vrstev kapalin a rychlosti ustanovování rovnovážné struktury jejich povrchu. [10]

Tabulka 1: Rozdělení metod pro měření povrchového napětí dle povrchové vrstvy

STATICKÉ METODY	SEMISTATICKÉ METODY	DYNAMICKÉ METODY
metoda kapilární elevace	metoda maximálního přetlaku bubliny	metoda oscilujícího proudu
metoda vyvažování Wilhelmyho destičky	metoda objemu kapky	měření rozptylu světla
metoda visící kapky	metoda Du Noüyova prstence	pozorování kapilárního vlnění na fázovém rozhraní
metoda rotující kapky	metoda Du Noüy - Paddayovy tyčky	metoda oscilující kapky
metoda přisedlé kapky	metoda stalagnometrická (vážení kapky)	

## 4.2 Metoda visící kapky

Princip metody visící kapky je založen na analýze zakřivení tvaru visící kapky (obrázek č.9). Pomocí dávkovače se vytlačuje kapka na špičku jehly. Kapka kapaliny se vytlačuje do plynné fáze – vzduchu, čímž vzniká mezifázové napětí mezi vnitřní a vnější fází, což je způsobeno vyšším tlakem uvnitř kapky. Kapka se přirozeně snaží zaujmout co nejmenší objem díky povrchovému napětí. Uvnitř kapky vzniká hydrostatický tlak přispívající k vnitřnímu tlaku, který také ovlivňuje zakřivení. [11]

$$\Delta p_h = \Delta \rho \cdot l \cdot g \quad (3)$$

Kde  $\Delta \rho$  je rozdíl hustot kapaliny a lehčí fáze,  $g$  je gravitační zrychlení,  $l$  je vzdálenost mezi koncem jehly a bodem měření.

Hydrostatický tlak závisí na vzdálenosti – pod koncem jehly je nejmenší a s nabývajícím vzdáleností se zvyšuje. To je důvod, proč má kapka hruškový tvar.

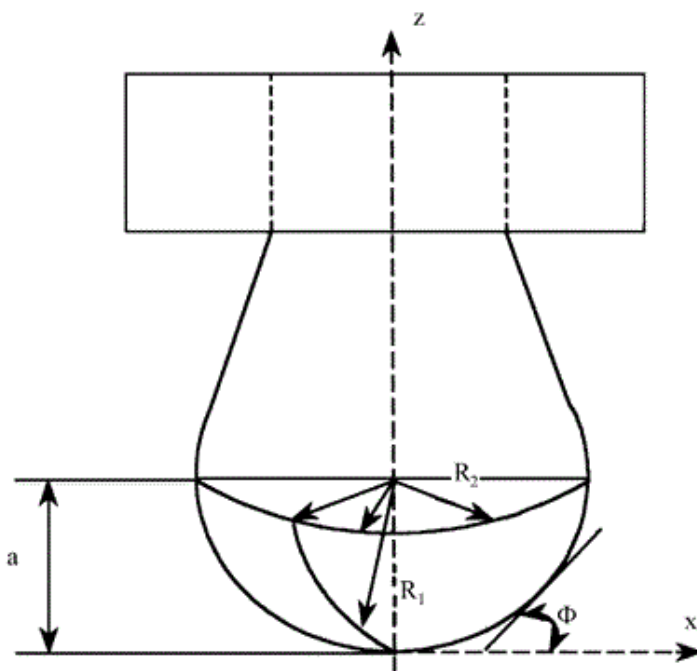
Tvar kapky závisí na gravitaci, jak lze vidět ze vztahu (3). Míru působení gravitační síly popisuje Bondovo číslo, jehož hodnota narůstá se zvýšením gravitace.

$$B_0 = \frac{\Delta \rho g R_0^2}{\gamma} \quad (4)$$

Při měření se zaznamenává tvar kapky na video, vypočte se Bondovo číslo dané kapky a díky  $B_0$  a  $\Delta \rho$  se vypočítá povrchové napětí. [11, 12]

Jedná se o jednoduchou a rychlou metodu pro analýzu profilu visící kapky. Měření touto metodou se řídí normou pro stanovení povrchového napětí ISO 19403-3: 2017. Tato metoda je velmi citlivá na vnější podmínky, tudíž zkreslení měření mohou způsobit otřesy nebo

přímé světlo. Proto je důležité umístění aparatury na místě bez vibrací a s tlumeným světlem. Velikost kapky je také velmi důležitá. Je-li kapka příliš malá, dojde ke snížení gravitačního efektu, snížení hodnoty  $B_0$  a možným zkreslením povrchového napětí. Aby se tomuto předešlo, je třeba také zvolit vhodný průměr jehly k vytlačení kapky. [15, 21]



Obrázek 9: Profil visící kapky [17]

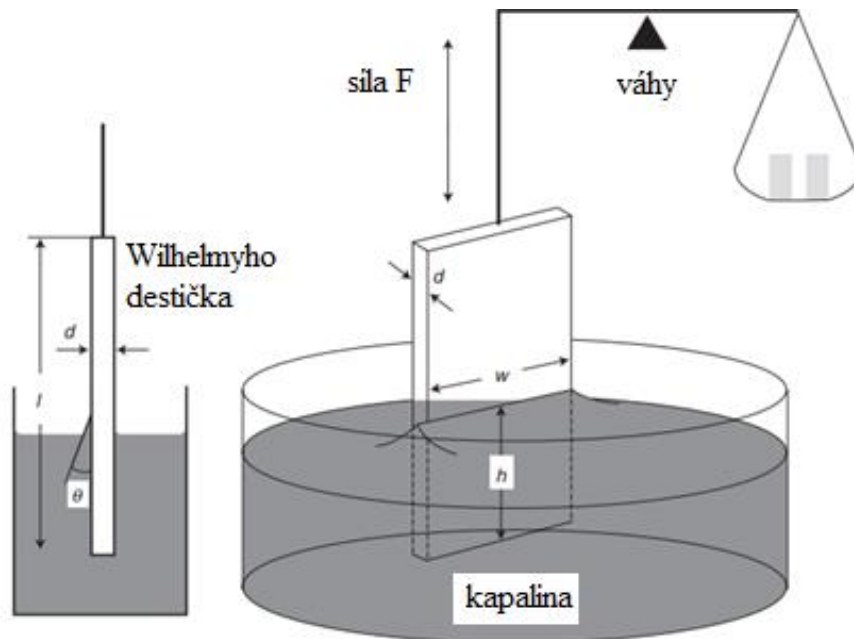
### 4.3 Wilhelmyho metoda

Wilhelmyho metoda je jedna z nejpoužívanějších technik k měření povrchového napětí. Metoda je vhodná pro povrchově aktivní látky a na rozdíl od metody Du Noüyova kruhu nejsou třeba vztahové korelace a výsledky teda nejsou ovlivněny mírnými viskozitami (1-10 Pa·s) kapalin. Tato metoda pro měření povrchového napětí je doporučena pro roztoky barev, rozpouštědel, laků (obecně nátěrových hmot) a roztoky pryskyřic. [18]

V této metodě je používána tenká platinová destička, která je rovnovážně a vertikálně zavěšena na velmi citlivých vahách tenziometru. Destička je ponořena částečně do kapaliny, jejíž povrchové napětí má být určeno. Kapalina destičku smáčí a po jejím obvodu vytvoří meniskus. Pokud je kontaktní úhel mezi kapalinou a deskou nulový, tak je povrch kapaliny orientovaný téměř svisle vzhůru. Což lze vidět na Obrázku č.:10: F je síla potřebná

k vyvážení destičky,  $l$  je délka destičky,  $d$  je tloušťka destičky,  $w$  je šířka destičky,  $h$  je výška, do které je destička ponořena,  $\theta$  je úhel svírající deska s kapalinou.

$$\gamma = \frac{F}{L \cdot \cos \theta} \quad (2)$$



Obrázek 10: Princip stanovení povrchového napětí pomocí Wilhelmyho destičky [13]

Wilhelmyho metodu můžeme použít pro měření ve stacionárním, ale i dynamickém uspořádání. Díky senzitivním vahám je přístroj citlivý na vibrace z okolí. Použitá destička musí mít stejnorodý povrch, aby nedocházelo ke zkreslení měření. [14, 18]

#### 4.3.1 Závislost povrchového napětí na teplotě

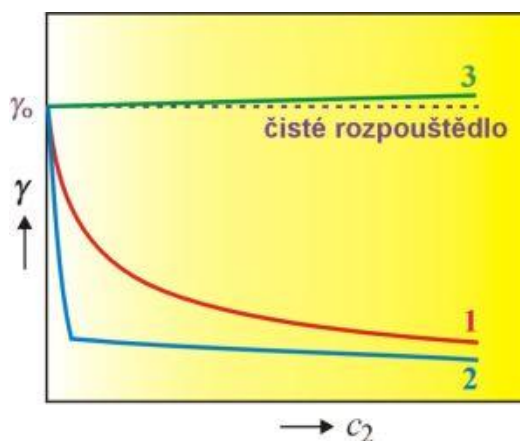
Povrchové napětí závisí na teplotě. Se zvyšující se teplotou klesá hodnota povrchového napětí a při kritické teplotě se rovná nule. Závislost povrchového napětí na teplotě vyjadřuje Eötvösova rovnice ve tvaru:

$$\gamma \left( \frac{M}{\rho_l} \right)^{\frac{2}{3}} k \cdot (T_c - T) \quad (5)$$

Kde  $k$  je empirická konstanta,  $\rho_l$  je hustota kapaliny,  $T_c$  kritická teplota,  $T$  teplota kapaliny. [10]

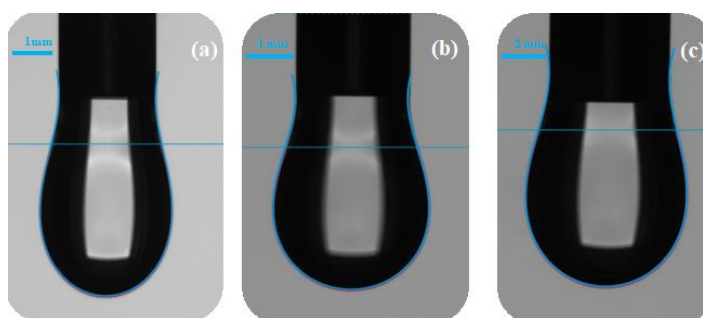
### 4.3.2 Závislost povrchového napětí na koncentraci

U čistých kapalin dochází k ustálení rovnováhy povrchového napětí téměř okamžitě. U roztoků se však povrchové napětí liší od povrchových napětí čistých kapalin proto, že dochází k adsorpci na fázovém rozhraní. Povrchové napětí roztoků se je tedy závislé na koncentraci. [10]



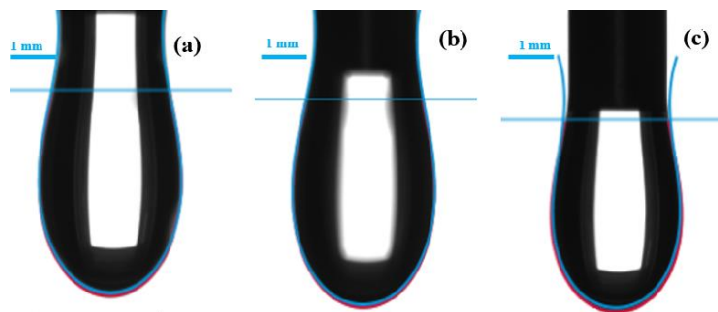
Obrázek 11: Závislost povrchového napětí na koncentraci [25]

Povrchové napětí závisí na vlastnostech rozpuštěné látky, ale i na vlastnostech rozpouštědla. Znatelné snížení povrchového napětí mohou způsobit některé látky i v malém množství. Tomuto chování odpovídá křivka č. 1 a č. 2 na obrázku č. 11. Takové látky se označují jako povrchově aktivní. Křivka č. 1 představuje typické chování vodných roztoků většiny povrchově aktivních a ve vodě rozpustných organických sloučenin. Křivka č. 2 představuje typické chování vysoce povrchově aktivních s amfifilní molekulovou stavbou. Křivka č. 3 představuje chování některých systémů (např. vodný roztok anorganických elektrolytů), kdy dochází naopak ke zvýšení povrchového napětí. Látky s tímto chováním jsou označeny jako povrchově inaktivní. [10]



Obrázek 12: Visící kapka systému při ředění 40: 60 hm. % lak/ rozpouštědlo

(a) lak + B1, (b) lak + MP, (c) lak +B2



Obrázek 13: Visící kapka systému při ředění 72: 28 hm. % lak / rozpouštědlo

(a) lak + B2, (b) lak + MP, (c) lak +IPA

#### 4.4 Stanovení rychlosti odpařování

Odpařování je děj, kdy na povrchu kapaliny dochází k přechodu kapalné látky na látku plynou při dané teplotě. Mezi molekulami v kapalině působí přitažlivé síly. Pokud se molekula nachází uvnitř kapaliny, dojde k vyrušení sil a molekula se může volně pohybovat. Kdyžto pokud se molekula nachází na povrchu kapaliny, působí tam větší síly zevnitř kapaliny než z jejího okolí a přitahují do směrem dovnitř. Díky tomu se kapalina sníží zaujmout co nejmenší tvar s co nejmenším obsahem povrchu. Aby mohlo dojít k přechodu z kapalné fáze do fáze plynné, je nutné překonat tyto síly. Kapalínu opouští jen molekuly s vysokou energií, klesá tak celková kinetická energie kapalina a tím se kapalina ochlazuje. Pokud dojde ke zvýšení teploty, zvýší se i počet molekul s vyšší energií přecházejících do plynné fáze. Z toho plyne, že se zvyšující se teplotou dochází k rychlejšímu odpařování kapaliny. Rychlost odpařování lze také zvýšit pomocí zvětšení plochy pro opařování nebo odvodem par z povrchu kapaliny. [24]

Rychlost odpařování je měřítkem pro stálost kapaliny na vzduchu při dané teplotě pod bodem varu. Stanovení rychlosti odpařování dle normy DIN 53170 slouží k hodnocení vlastností rozpouštědel pro výrobu laků a barev. Odpařování rozpouštědla závisí na parametrech specifických pro každé rozpouštědlo, teplotě a rychlosti vzduchu. [22]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**



## 5 PŘÍPRAVA VZORKŮ LAKOVACÍCH SMĚSÍ

### 5.1 Příprava vzorků pro měření

Před samotnou přípravou vzorků lakovacích směsí byly určeny 2 poměry procentuálního obsahu čistého laku a směsi rozpouštědel.

Tento poměr byl stanoven na 40 hm. % laku ku 60 hm. % rozpouštědla a 72 hm. % laku ku 28 hm. % rozpouštědla. U obou směsí byly připraveny roztoky o 11 různých koncentracích, kdy koncentrace narůstala po 10 hm. % (v jednom případě po 5 hm. %) v rozmezí

0 – 100 hm. %. Kombinace systémů popsány níže:

#### 1. Poměr ředění – 40:60 hm. % lak/ rozpouštědlo

A. Lak : MP a B1

B. Lak : MP a B2

#### 2. Poměr ředění – 72:28 hm. % lak /rozpouštědlo

A. Lak : MP a B1

B. Lak : MP a B2

C. Lak : MP a IPA

Množství laku a rozpouštědel, vypočtené dle poměrů, bylo naváženo na analytických vahách s přesností  $\pm 0,01$  g. Práce při navažování probíhala rychle, aby nedocházelo k odpařování rozpouštědel a reakci laku se světlem. Všechny složky poté byly smíseny a v uzavřených nádobách uloženy do temna.

## 6 POUŽITÉ MATERIÁLY A MĚŘICÍ METODY

### 6.1 Použité přístroje

- Laboratorní váhy – Mettler Toledo Classic
- Tenziometr Sigma 700
- Goniometr Krüss Advance

### 6.2 Použité materiály

- **UV vytvrditelný lak**

Použitý UV vytvrditelný lak je čirý lak na akrylátové bázi. Jeho obchodní název je SilFORT UVHC3000K.

- **Rozpouštědla**

Použitá rozpouštědla při experimentech byla:

- 1-methoxy-2-propanol s obchodním názvem Dowanol (MP)
- Propan-2-ol také jako izopropylalkohol (IPA)
- Butan-1-ol (B1)
- Butan-2-ol (B2)

Tabulka 2: Fyzikální vlastnosti použitého UV laku při 25 °C [19]

Fyzikální vlastnosti	UVHC3000K
Obsah pevných částic [hm. %]	45
Hustota $\rho$ $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1,025
Viskozita dynamická $\eta$ [ $mPa \cdot s^{-1}$ ]	8,9
Hlavní rozpouštědlo	1 – methoxy – 2 – propanol
Volitelná rozpouštědla	Isobutanol, n-butanol, isopropanol
Odolnost proti oděru [ $\Delta$ zákalu v %]	<10

Tabulka 3: Fyzikální vlastnosti použitých rozpouštědel při 25 °C [29]

Rozpouštědlo	Bod varu [°C]	Hustota [ $\frac{g}{cm^3}$ ]	Viskozita [ $mPa \cdot s^{-1}$ ]	Rychlost odpařování [diethyl ether = 1]
Isopropyl alkohol	82	0,78	2	11-13
Butan-1-ol	118	0,81	2,5	33
Butan-2-ol	99	0,81	3,1	24
1-methoxy-2-propanol	120	0,92	1,9	28

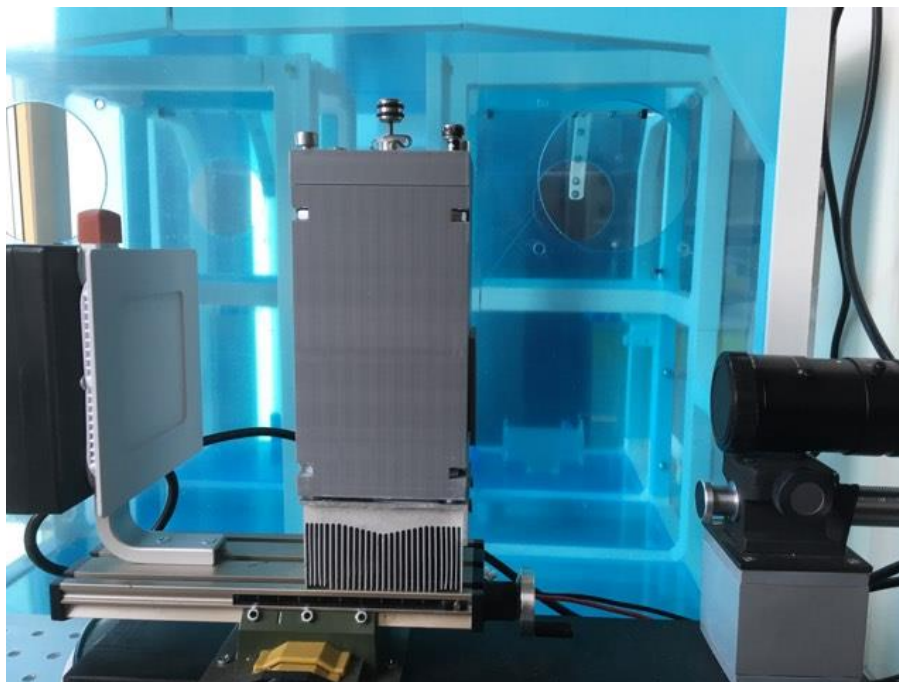
### 6.3 Metoda visící kapky

Jednou z metod použitých pro charakterizaci chování lakovacích směsí na fázovém rozhraní byla metoda visící kapky. Pro přesné měření je přístroj vybaven o temperovanou celou pro goniometrická měření. Metoda je velmi citlivá na vnější podmínky, jak je uvedeno v teoretické části, proto je přístroj umístěn na antivibračním podstavci, který eliminuje vibrace zkreslující měření. Aby nedocházelo k odpařování rozpouštědel z povrchu kapky a tím se nezmenšoval její objem, bylo třeba vytvořit kolem kapky prostředí nasycených par.

Jehla s kapkou byla proto umístěna do skleněné kyvety s dostatečným množstvím měřeného roztoku a celý prostor se temperoval na 25 °C.

#### Postup měření:

Do injekční stříkačky s jehlou o průměru 1,83 mm bylo nataženo 1 ml měřeného roztoku. Stříkačka s roztokem byla nejprve temperována na teplotu 25 °C. Po temperaci byla kapka vytlačena a následně měřena. Pro každý systém lakovací směsi bylo měření 3x zopakováno. Čištění a sušení stříkačky a jehly mezi jednotlivými měřeními bylo prováděno za pomoci ethanolu, destilované vody a stlačeného vzduchu.



Obrázek 14: Goniometr s temperovací celou

#### 6.4 Wilhelmyho metoda

Další z metod použitých pro charakterizaci chování lakovacích směsí byla Wilhelmyho metoda. K měření byly využity skleněné Petriho misky, které byly čištěny pomocí lázní s kyselinami, destilovanou vodou a sušením v sušárně při 120 °C. Čistotě je vždy věnována velká pozornost i u platinové destičky, aby nedošlo ke kontaminaci kapalného povrchu prachem, či jinými nečistotami.

Pro kontrolu čistoty misky bylo prováděno kontrolní měření povrchového napětí s čistou vodou. Tabulková hodnota povrchového napětí pro vodu je 72,45nN/m při teplotě 20 °C.

##### **Postup měření:**

Tato metoda měření byla prováděna se sadami vzorků při dvou teplotách, při 25 °C a 35 °C. Nejprve byl měřený roztok temperován v uzavřené nádobě na teplotu 25 °C, poté důkladně promíchán a přelit o dostatečném množství do Petriho misky a umístěn do tenziometru, kde probíhalo měření pomocí platinové destičky. Pro každý systém lakovací směsi bylo měření 3x zopakováno při teplotě 25 °C i 35 °C.



Obrázek 15: Tenziometr Sigma 700

## 6.5 Stanovení rychlosti odpařování

Pro charakterizaci chování rozpouštědel v lakovací směsi byla stanovena rychlost odpařování jednotlivých rozpouštědel ze systému. Měření bylo prováděno při teplotě 25 °C. K měření byly využity skleněné Petriho misky, které byly čištěny pomocí lázní s kyselinami, destilovanou vodou a sušením v sušárně při 120 °C.

### Postup měření:

Stanovení probíhalo se sadami vzorků při teplotě 25 °C. Nejprve byl roztok temperován na požadovanou teplotu, poté důkladně promíchán a o dostatečném množství přelit do Petriho misky. Jako substrát byl použitý filtrační papír o průměru 5 cm. Aby nedošlo k ovlivnění měření plochou či pórovitostí papíru, byl vždy použit jen jeden druh filtračního papíru. Filtrační papír byl namočen do vzorku a na Petriho misce umístěn do prostoru uzavřených analytických vah, aby nedocházelo k ovlivnění měření okolním cirkulujícím vzduchem. Zde se sledoval a zaznamenával úbytek hmotnosti v čase. Odpařování bylo zaznamenáváno po dobu 120 min s různými časovými intervaly. Intervaly se měnily, jelikož nás podrobně zajímaly úbytky bezprostředně po nanesení laku.

## 7 VÝSLEDKY A DISKUSE

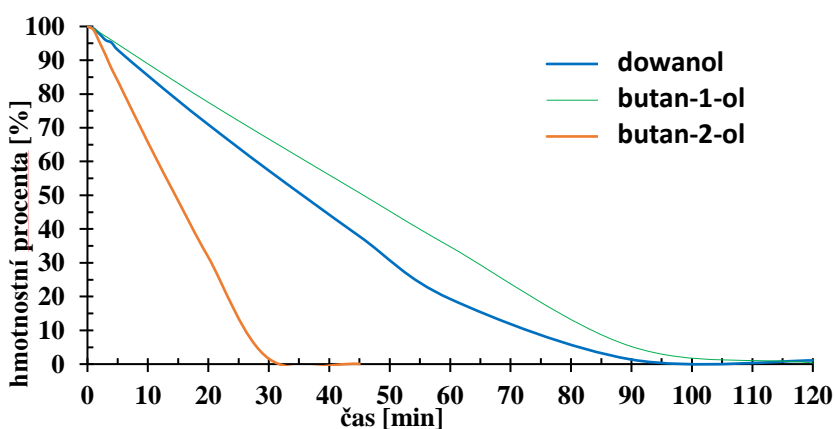
V této kapitole jsou shrnuty výsledky hmotnostního úbytku rozpouštědel v závislosti na čase, výsledky měření povrchového napětí pomocí Wilhelmyho metody a metody visící kapky. Lakovací systémy byly v připraveny v následujících poměrech: 40 hm. % : 60 hm.% (lak : rozpouštědla) a 72 hm. % : 28 hm. % (lak : rozpouštědla). Ve směsích byla použita tři rozpouštědla. Prvním z nich bylo 1- methoxy-2-propanol (MP nebo dowanol) jako hlavní rozpouštědlo, kdežto butan-1-ol (B1), butan-2-ol (B2) a izopropylalkohol (IPA) byla rozpouštědla volitelná.

### 7.1 Poměr ředění 40 hm. % laku : 60 hm. % rozpouštědla

U daného poměru ředění (40 hm. % laku : 60 hm. % rozpouštědel) byla použita tři rozpouštědla, avšak jedno z nich (Dowanol) bylo použito vždy jako hlavní rozpouštědlo. Další byla použita vždy v jeho kombinaci (Dowanol/ butan-1-ol, Dowanol/ butan-2-ol).

#### 7.1.1 Stanovení rychlosti odpařování

Závislost hmotnostních procent lakovací směsi na čase odpařování lze vidět na obrázku č. 16. Pro lepší představu byla hmotnost převedena na hmotnostní procenta. Z grafu lze vidět, jak postupně klesá hmotnost v čase. Tedy lze říci, jakou funkci zaujímají daná rozpouštědla v lakovacích systémech. V systému D / B2 bude dowanol odpovědný za výsledný vzhled lakovaného substrátu a B2 za penetraci do substrátu. V systému D / B1 bude dowanol odpovědný naopak za penetraci do substrátu a B1 za výsledný vzhled lakovaného substrátu.

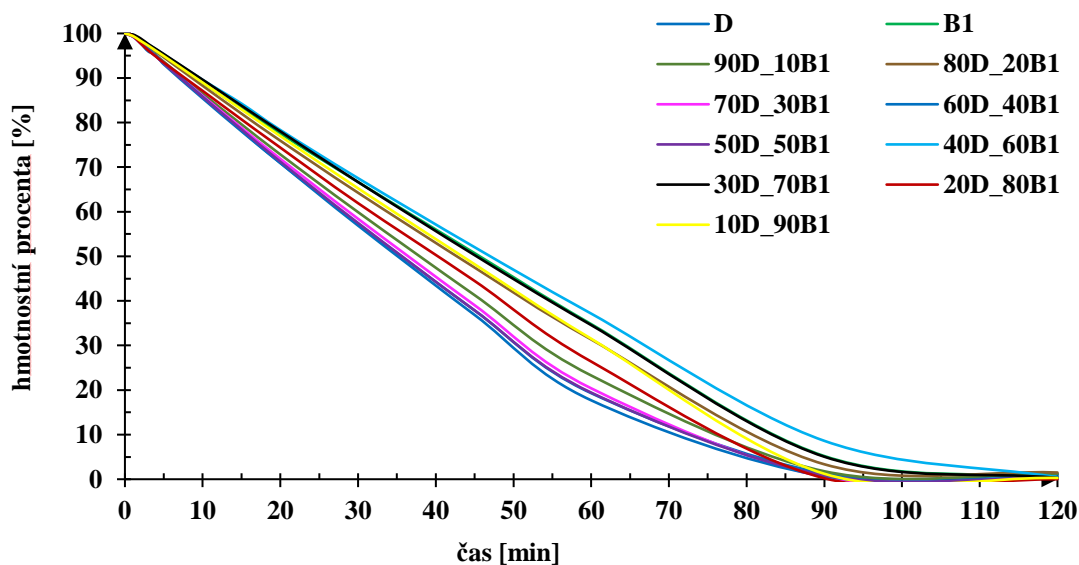


Obrázek 16: Odpařování čistých rozpouštědel ze systému Dowanol, B1, B2 + lak

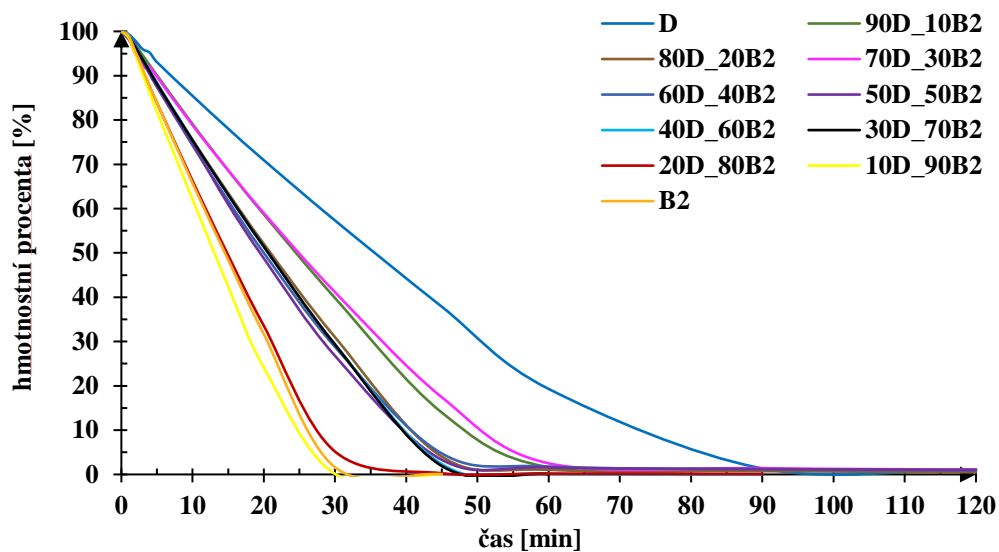
Jak bylo řečeno v teoretické části, rozpouštědla odpovídají za penetraci laku na substrátu a výsledný vzhled povrchu po lakování v závislosti na rychlosti odpařování rozpouštědel.

Z obrázků č. 17 a č. 18 je patrné, že různé poměry rozpouštědel mají vliv na rychlost odpařování. Odpařování probíhalo zpočátku rychle a v určité chvíli došlo ke zpomalení. Na obrázku č. 17 lze vidět, že nedocházelo k výrazným změnám rychlosti odpařování při navyšování procentuálního zastoupení butan-1-olu. Na obrázku č. 18 jsou změny naopak markantní. Při navyšování procentuálního zastoupení butan-2-olu ve směsi docházelo ke výrazně rychlejšímu odpařování rozpouštědel.

Zkrácení času potřebného k odpařování lze využít při samotných aplikacích lakování. Pro průmyslové využití může být tato skutečnost důležitá pro celkové urychlení procesu lakování. Je však na dalším výzkumu, aby bylo otestováno, jestli i při rychlejšímu odpařování rozpouštědel ze směsi nedojde např. ke zhoršení výsledného povrchu nátěru.



Obrázek 17: Odpařování systému Dowanol / B1 + lak

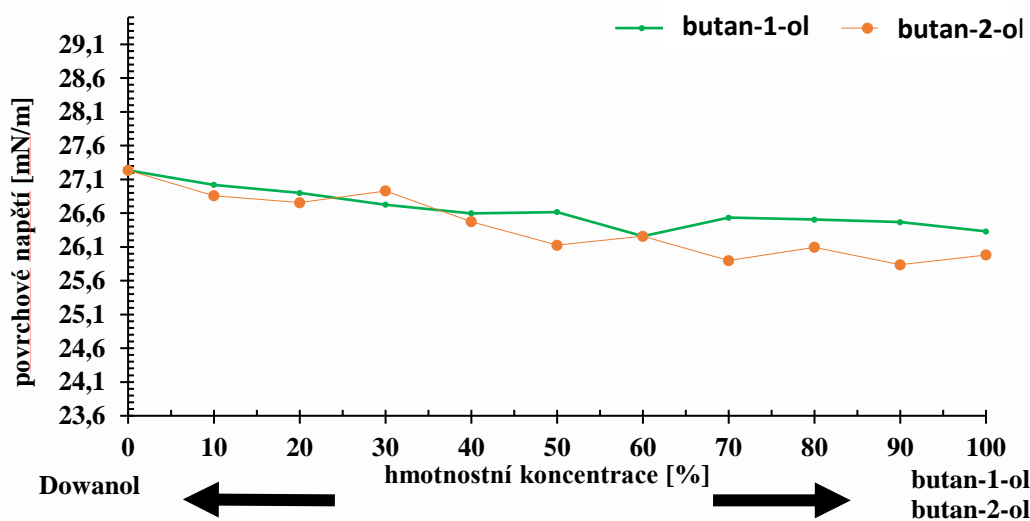


Obrázek 18: Odpařování systému Dowanol / B2 + lak

### 7.1.2 Stanovení povrchového napětí tenziometricky

Povrchového napětí lakovací směsi bylo stanoveno pomocí Wilhelmyho metody. Na obrázku č. 19 je závislost povrchového napětí na hmotnostní koncentraci. V systémech bylo postupně zvyšováno zastoupení B1 a B2 na úkor Dowanolu. Avšak tyto změny v zastoupení nemají až takový vliv na celkové povrchové napětí.

Povrchové napětí souvisí s rozlevem lakovací směsi. Dle měření nelze jednoznačně říci, zda změna volitelného rozpouštědla (B1 a B2) bude mít takový vliv pro aplikační problém nátěru teda lepšího rozlevu po ploše.



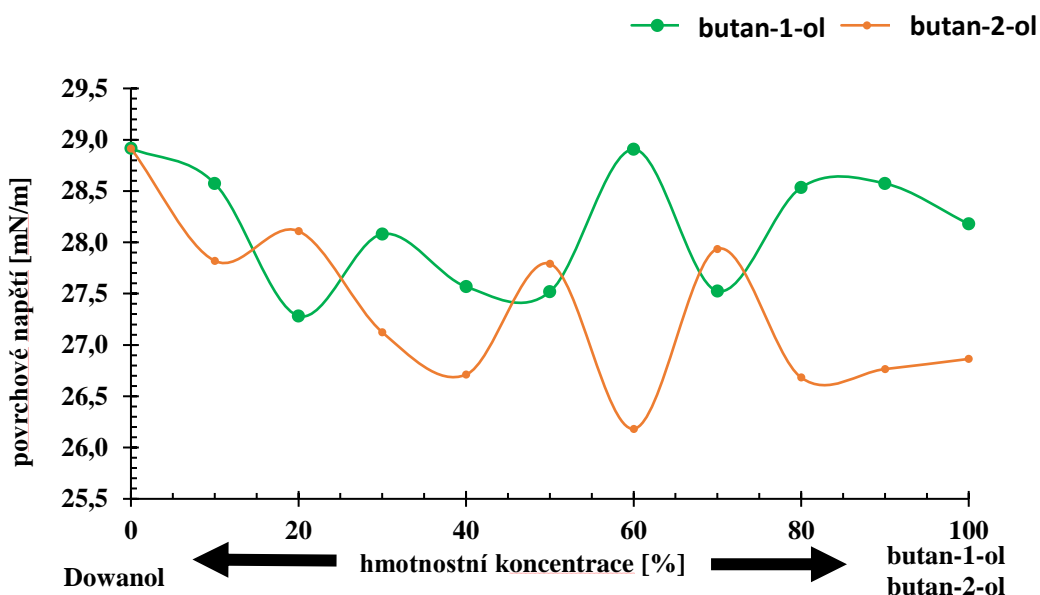
Obrázek 19: Závislost povrchového napětí systému Dowanol / B1 + lak a Dowanol / B2 + lak



### 7.1.3 Stanovení povrchového napětí goniometricky

Povrchové napětí lakovací směsi bylo stanoveno pomocí metody visící kapky. Na obrázku č. 20 je závislost povrchového napětí na hmotnostní koncentraci. V systémech bylo postupně zvyšováno zastoupení B1 a B2 na úkor Dowanolu. Tyto změny v zastoupení volitelných rozpouštědel se výrazně projeví na měření. Obecně lze říci, že v určitých poměrech docházelo ke snížení hodnot povrchového napětí. Předpokládalo se snížení povrchového napětí. Avšak chování systému nebylo dle očekávání. Při měření byly potlačeny vnější vlivy jako jsou otřesy nebo odpařování rozpouštědel.

Mohu se jen domnívat, že pro tyto systémy nebyla daná měřicí metoda vhodná vzhledem k výsledkům povrchového napětí.



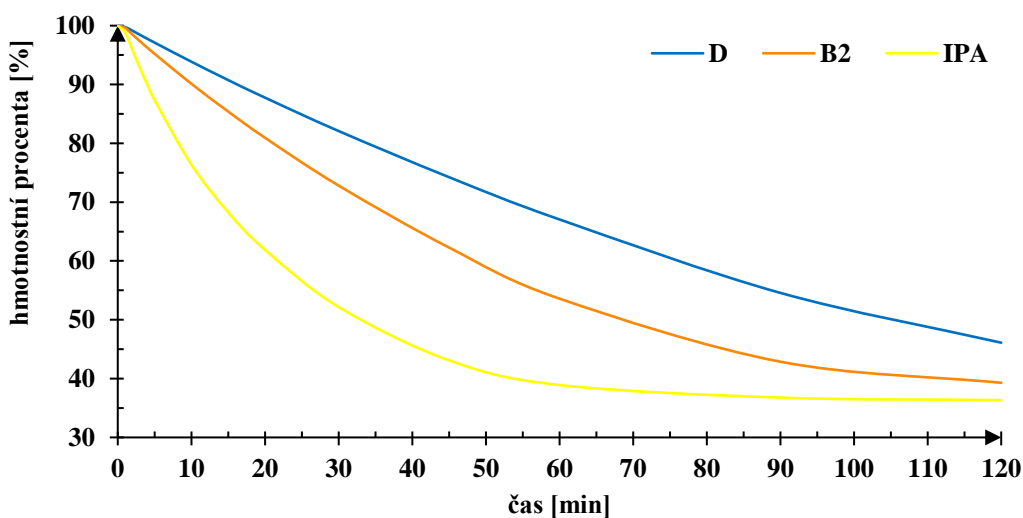
Obrázek 20: Závislost povrchového napětí systému Dowanol / B1 + lak a Dowanol / B2 + lak

## 7.2 Poměr ředění 72 hm. % laku : 28 hm. % rozpouštědla

U daného poměru ředění (72 hm. % laku : 28 hm. % rozpouštědel) byla použita tři rozpouštědla, avšak jedno z nich (Dowanol) bylo použito vždy jako hlavní rozpouštědlo. Další byla použita vždy v jeho kombinaci (Dowanol/ isopropylalkohol, Dowanol/ butan-2-ol).

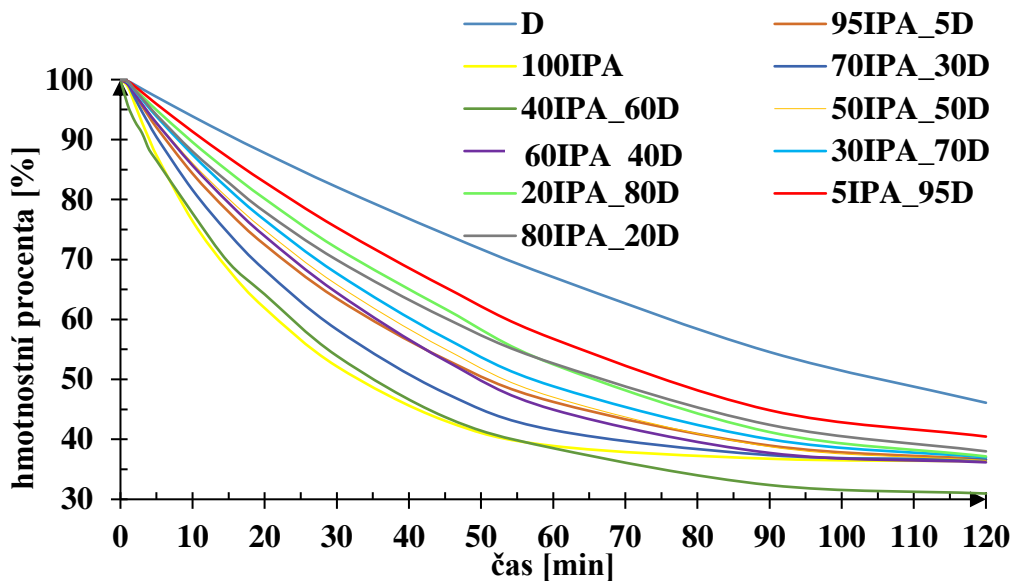
### 7.2.1 Stanovení rychlosti odpařování

Závislost hmotnostních procent lakovací směsi na čase odpařování lze vidět na obrázku č. 21. Pro lepší představu byla hmotnost převedena na hmotnostní procenta. Z grafu lze vidět, jak postupně klesá hmotnost v čase. Tedy lze říci, jakou funkci zaujímají daná rozpouštědla v lakovacích systémech. V systému D / B2 bude dowanol odpovědný za výsledný vzhled lakovaného substrátu a B2 za penetraci do substrátu. V systému D / IPA bude dowanol odpovědný také za výsledný vzhled lakovaného substrátu a IPA za penetraci do substrátu.

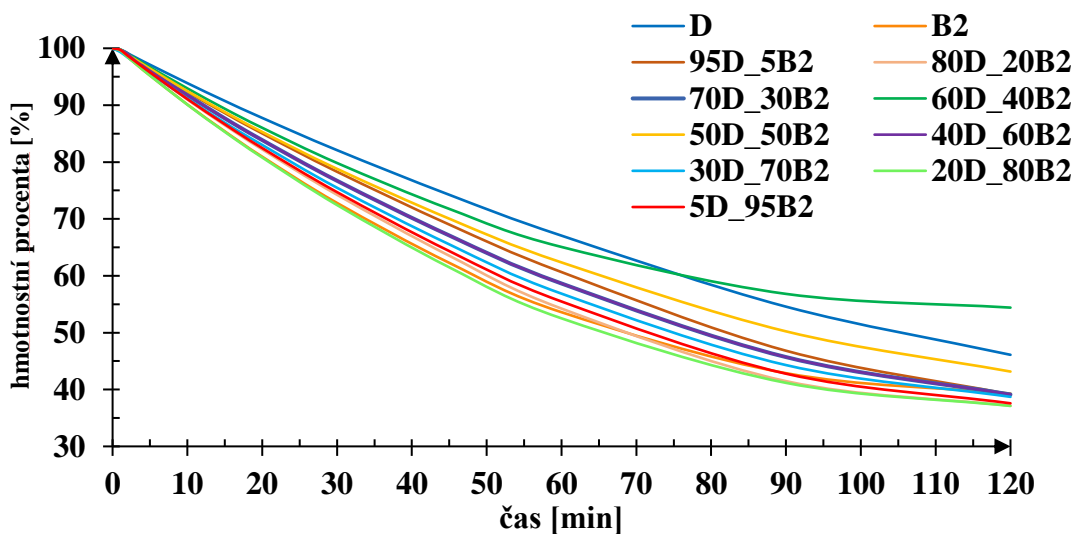


Obrázek 21: Odpařování čistých rozpouštědel ze systému Dowanol, B2, IPA + lak

Z obrázků č. 22 a č. 23 je patrné, že různé poměry rozpouštědel mají vliv na rychlost odpařování. Odpařování probíhalo zpočátku rychle a v určité chvíli došlo ke zpomalení. Na obrázku č. 22 lze vidět, že docházelo k výrazným změnám rychlosti odpařování při navyšování procentuálního zastoupení isopropylalkoholu. Na obrázku č. 23 jsou změny na začátku odpařování velmi malé. Při navyšování procentuálního zastoupení butan-2-olu ve směsi nedocházelo ke výrazně rychlejšímu odpařování rozpouštědel.



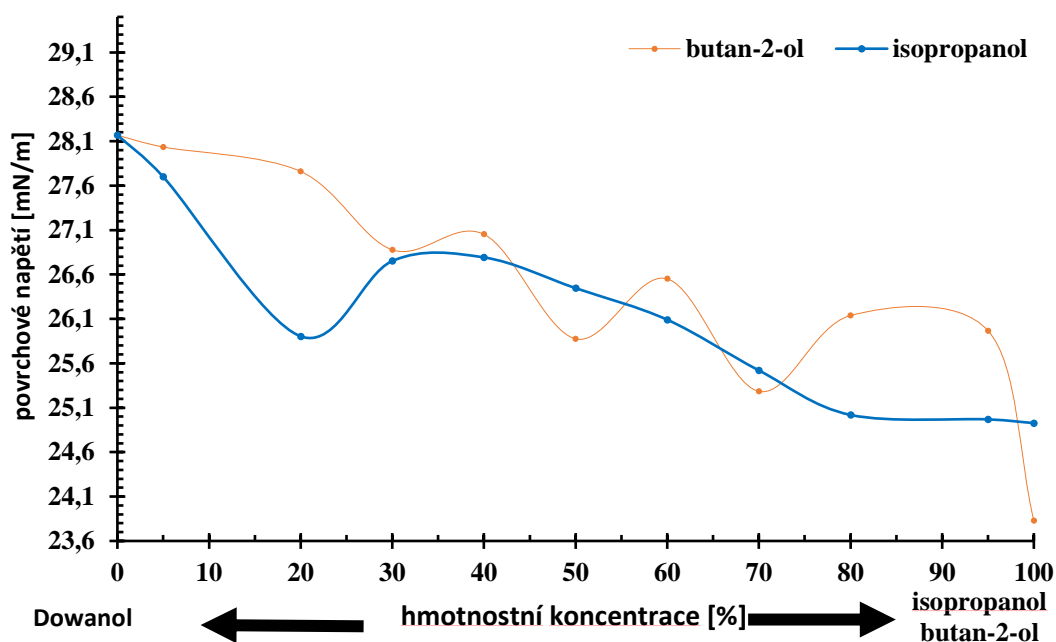
Obrázek 22: Odpařování systému Dowanol / IPA + lak



Obrázek 23: Odpařování systému Dowanol / B2 + lak

### 7.2.2 Stanovení povrchového napětí tenziometricky

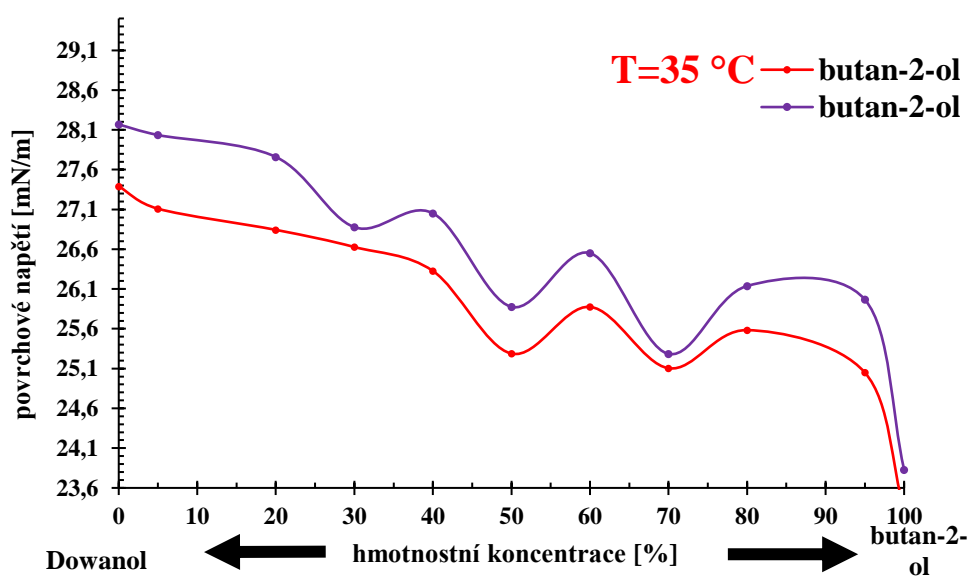
Povrchového napětí lakovací směsi bylo stanoveno pomocí Wilhelmyho metody. Na obrázku č. 24 je závislost povrchového napětí na hmotnostní koncentraci. V systémech bylo postupně zvyšováno zastoupení B2 a IPA na úkor Dowanolu. Tyto změny v zastoupení mají vliv na celkové snížení povrchového napětí systému. Lze tedy předpokládat, že se tato změna projeví při aplikaci nátěru.



Obrázek 24: Závislost povrchového napětí systému Dowanol / B2 + lak a Dowanol / IPA + lak

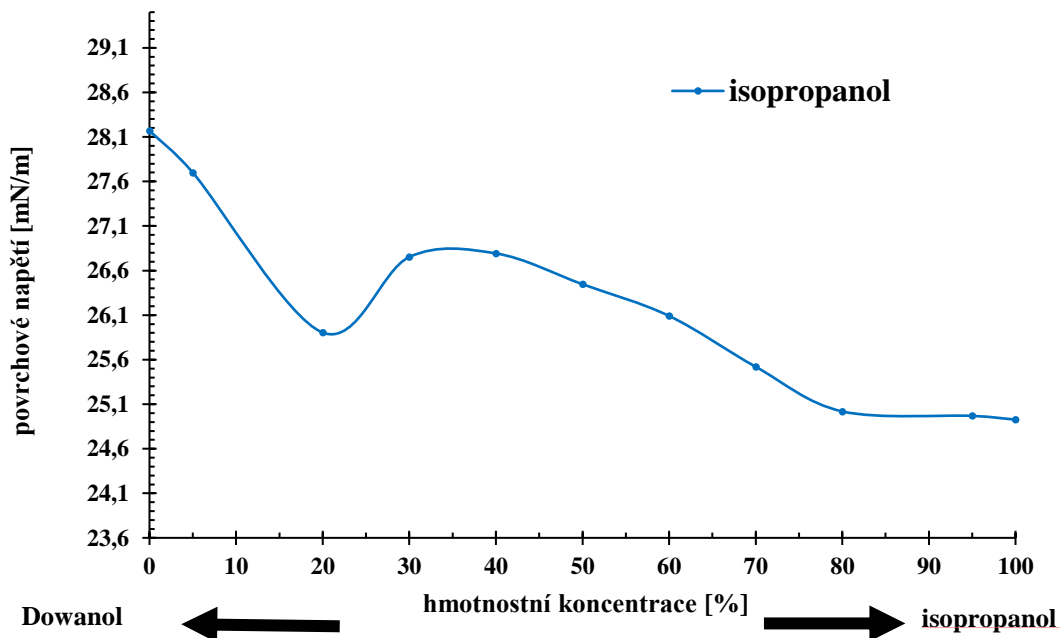
Další měření povrchového napětí bylo se systémy Dowanol / B2 + lak při dvou teplotách. Při teplotě 25 °C a 35 °C, aby bylo charakterizováno jejich chování v provozních aplikacích.

Na obrázku č. 25 lze vidět, že při obou teplotách dochází k celkovému snížení povrchového napětí lakovací směsí, což je žádoucí. Při vyšší teplotě systému bylo sníženo povrchové napětí, avšak rozdíl není tak velký.



Obrázek 25: Závislost povrchového napětí systému Dowanol / B2 + lak při teplotě 25 °C a 35 °C

Další systém pro měření povrchového napětí byl Dowanol / IPA, kdy na obrázku č. 26 lze vidět, jak se povrchové napětí snižuje v závislosti narůstajícího zastoupení IPA na úkor Dowanolu.

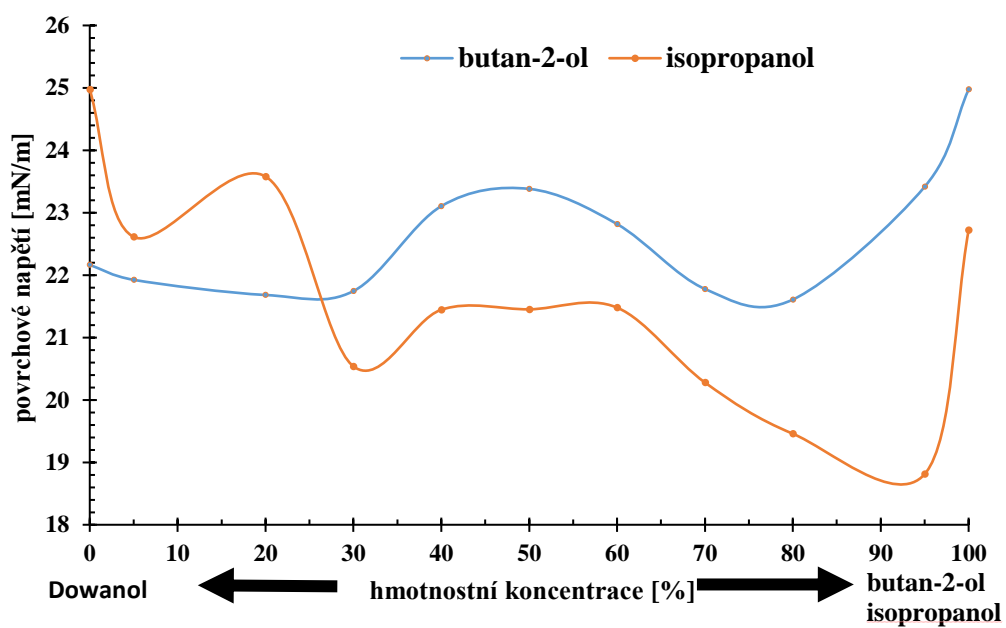


Obrázek 26: Závislost povrchového napětí systému Dowanol / IPA + lak

### 7.2.3 Stanovení povrchového napětí goniometricky

Povrchové napětí lakovací směsi bylo stanoveno pomocí metody visící kapky. Na obrázku č. 27 je závislost povrchového napětí na hmotnostní koncentraci. V systémech bylo postupně zvyšováno zastoupení B2 a IPA na úkor Dowanolu. Změny v zastoupení volitelných rozpouštědel se výrazně projevily na měření. Chování systému nebylo dle očekávání. Při měření byly potlačeny vnější vlivy jako jsou otřesy nebo odpařování rozpouštědel.

Mohu se jen domnívat, že pro tyto systémy nebyla daná měřicí metoda vhodná vzhledem k výsledkům povrchového napětí.



Obrázek 27: Závislost povrchového napětí systému Dowanol / IPA a Dowanol / B2 + lak

## ZÁVĚR

V průběhu lakování na principu polévání ve vertikálním směru může docházet ke vzniku vad. K těm nejčastějším patří zejména nehomogenita lakované vrstvy projevující se rozdílnou tloušťkou laku na celé ploše desky, nedostatečná přilnavost laku k desce nebo nedostatečné rozlévání laku po povrchu desky. Cílem práce bylo nalezení vhodného systému laku a rozpouštědel, který by pomohl zamezit těmto vadám. Proto byly připraveny dva odlišné poměry lakovacích směsí: 40 hm. % : 60 hm.% (lak : rozpouštědla) a 72 hm. % : 28 hm. % (lak : rozpouštědla). Ve směsích byla použita tři rozpouštědla. Prvním z nich bylo 1-methoxy-2-propanol jako hlavní rozpouštědlo, kdežto butan-1-ol, butan-2-ol a isopropylalkohol byla rozpouštědla volitelná. Jedno rozpouštědlo v systému mělo vliv na penetraci lakovací směsi do lakované desky, kdežto druhé mělo vliv na finální vzhled nátěru.

Pro získání vhodného poměru rozpouštědel v lakovacích směsích bylo nutné nejprve charakterizovat povrchové napětí a poté i chování jednotlivých rozpouštědel v systémech při odpařování. Při srovnání metod pro měření povrchového napětí bylo zjištěno, že vhodnější pro charakterizaci systémů bylo měření dle Wilhelmyho metody. Při stanovení povrchového napětí pomocí visící kapky nebylo chování lakovacích směsí dle očekávání.

Stanovení rychlosti odpařování volitelných rozpouštědel (B1, B2, IPA) u systémů 40 hm.% : 60 hm.% laku a rozpouštědel a následně u 72 hm. % : 28 hm. % laku a rozpouštědel charakterizovalo funkci jednotlivých rozpouštědel v systémech.

Stanovení povrchového napětí u systémů 40 hm.% : 60 hm.% laku a rozpouštědel a následně u 72 hm. % : 28 hm. % laku a rozpouštědel prokázalo jeho předpokládané snižování v závislosti na zvyšujícím se zastoupení volitelných rozpouštědel (B1, B2, IPA). Toto snížení se nejvíce projevilo u systému s vyšším procentuálním zastoupení laku.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] GOLDSCHMIDT a STREITBERGER. *Basics of coating technology*. 2. Münster: BASF, 2007. ISBN 3-86630-903-1.
- [2] BĚLOHLÁVEK. Dokumentace vlivů na životní prostředí. *Portal.cenia.cz* [online]. Česká republika, 2016 [cit. 2020-8-25]. Dostupné z: [https://portal.cenia.cz/eiasea/download/RUIBX09WMTE3N19kb2t1bWVudGFjZURPQ183MzgyMDYzNTk2MTA1MzlwMTAyLnBkZg/OV1177\\_dokumentace.pdf](https://portal.cenia.cz/eiasea/download/RUIBX09WMTE3N19kb2t1bWVudGFjZURPQ183MzgyMDYzNTk2MTA1MzlwMTAyLnBkZg/OV1177_dokumentace.pdf)
- [3] *Dacrylate* [online]. 2017 [cit. 2020-9-16]. Dostupné z: <http://www.dacrylate.co.uk/Hub/application.html>
- [4] MANUEL. Paint film defects and solutions. *SCRIBD* [online]. Saudi Arabia [cit.2020-5-16].Dostupné z: [https://www.scribd.com/presentation/273137273/Paint-FilmDefects?fbclid=IwAR22Vc8-jwkAa4N0MBYPqu1z9HX5AhnzjM8naSosJL5FxTuq5Hwu\\_IWkCel](https://www.scribd.com/presentation/273137273/Paint-FilmDefects?fbclid=IwAR22Vc8-jwkAa4N0MBYPqu1z9HX5AhnzjM8naSosJL5FxTuq5Hwu_IWkCel)
- [5] Sagging paint. *Buyersask* [online]. [cit. 2021-3-16]. Dostupné z: <https://buyersask.com/interior/paint-interior/sagging-paint/>
- [6] Orange peel. *Korozyonuzmani* [online]. [cit. 2021-2-12]. Dostupné z: <https://www.korozyonuzmani.com/en/boya-hatalari-7-portakhttps://www.korozyonuzmani.com/en/boya-hatalari-7-portakallanma/?fbclid=IwAR127cWLFZM1ogRqQ73LRGuDzX7bprqsXeIX9YKPJ3BkbHyhSV8PBA8ys8kallanma/?fbclid=IwAR127cWLFZM1ogRqQ73LRGuDzX7bprqsXeIX9YKPJ3BkbHyhSV8PBA8ys8k>
- [7] MECHLOVÁ, Erika. *Molekulová fyzika*. 1. Ostrava: Ediční středisko CIT OU, 2004. ISBN 80-7042-989-5.
- [8] EBNESAJJAD. *Surface treatment of materials for adhesing bonding*. 1. William Andrew, 2006. ISBN 978-0-8155-1523-4.
- [9] MORTIMER, R.G. *Physical chemistry*. 3. Elsevier: Academic Press, 2008. ISBN - 13:978-0-12-370619-1.
- [10] ŠIŠKOVÁ a BARTOVSKÁ. *Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav*. Praha, 2010. ISBN 9788070807453.



- [11] KRÜSS GmbH, Pendant Drop Measurements, dostupné z <https://www.kruss-scientific.com/products/contact-angle/dsa30/drop-shape-analyzer-dsa30/>
- [12] Standard Test Methods for Surface and Interfacial Tension of Solutions of Paints, Solvents, Solutions of Surface-Active Agents, and Related Materials. *Kruss-scientific* [online]. [cit. 2021-2-18]. Dostupné z: <https://www.kruss-scientific.com/en/know-how/standards-and-norms/astm-d1331-14>
- [13] KRÜSS [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.kruss-scientific.com/services/educationtheory/glossary/wilhelmy-plate-method/>
- [14] NING a FORTUNATO. Dynamic surface tension measurement with a dynamic Wilhelmy plate. *Technique, Journal of colloid and interface science* [online]. 1999 [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: [dostupné z: https://www.sciencedirect.com](https://www.sciencedirect.com)
- [15] BERRY. *Measurnament of surface and interfacial tension pendant drop tensiometry* [online]. 2015 [cit. 2020-11-20]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002197971500466X>
- [16] Tensiometr 700/701. *Biolinscientific* [online]. [cit. 2021-2-19]. Dostupné z: <https://www.biolinscientific.com>
- [17] DEMARQUETTE a ARASHIRO. *Use of the Pendant Drop Method to Measure Interfacial Tension* [online]. [cit. 2021-2-12]. Dostupné z: <https://www.scielo.br/pdf/mr/v2n1/0004.pdf>
- [18] ASTM D1331-14: *Standart test methods for surface and interfacial tension of solutions of paints, solvents, solutions of surface-active agents, and related materials*. 2015.
- [19] *Momentive waterford: Technical data sheet SilFORT UVHC 3000K* [online]. [cit. 2021-2-12]. Dostupné z: <https://www.momentive.com>

- [20] KALEDOVÁ a KALENDA. *Technologie nátěrových hmot: Pojiva, rozpouštědla a aditiva pro výrobu nátěrových hmot*. 1. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2004. ISBN 80-7194-691-5.
- [21] ISO 19403-3: 2017. *Paints and varnishes - wettability - part 3: Determination of the surface tension of liquids using the pendant drop method*. 1. 2017.
- [22] DIN 53170. *Solvents for paints and varnishes- Determination of the evaporation rate*. 2009.
- [23] LUKAVSKÝ. *Nátěrové hmoty*. 3., upravené. Praha: Merkur, 1993. ISBN 80-7032-313-2.
- [24] *Odpařování* [online]. Ústí nad Labem: Univerzita Jana Evangelisty Purkyně, Fakulta životního prostředí [cit. 2021-3-18]. Dostupné z: [http://fzpj.ujep.cz/ktv/uc\\_texty/pt3/11%20Odparovani.pdf](http://fzpj.ujep.cz/ktv/uc_texty/pt3/11%20Odparovani.pdf)
- [25] ŠIŠKOVÁ a BARTOVSKÁ. *Co je v povrchové a koloidní chemii* [online]. VŠCHT Praha, 2005 [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: [https://vydavatelstvi-old.vscht.cz/knihy/uid\\_es-001/figures/povrchove\\_napeti\\_roztoku.jpg](https://vydavatelstvi-old.vscht.cz/knihy/uid_es-001/figures/povrchove_napeti_roztoku.jpg)
- [26] BASF. *Dispersion and pigments* [online]. Ludwigshafen Německo, 2017 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.dispersionspigments.basf.com>
- [27] THOMA, Patrik. *UV laky technologie nanášení. Svět tisku* [online]. 2005, [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.vseotisku.cz/uv-laky-technologie-nanaseni/>
- [28] MOKROŠ, Martin. *Aplikace laků vytvrzovaných UV zářením a možnosti jejich průmyslového využití. Transfer*. 2014, ISSN 1801-9315.
- [29] *Suitable solvents for SilFORT coatings* [online]. [cit. 2021-3-21]. Dostupné z: <https://www.momentive.com>
- [30] *Preheating of a solvent-bourne UV-curable clearcoat on PC* [online]. [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.momentive.com>
- [31] *Epoxy-acrylate. Sartomer* [online]. [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://asia.sartomer.com>

- 
- [32] *UV Coatings – Main UV-Binders and Performance* [online]. [cit. 2021-5-5].  
Dostupné z: <https://www.momentive.com>
- [33] SCHWALM. *UV coatings: Basics, recent developments and new application*.  
1. Amsterdam. ISBN 04-445-2979-9.
- [34] BUTT, GRAF a KAPPL. *Physics and chemistry of interfaces*. Wiley, 2003.  
ISBN 3-57-40413-9.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

symbol	jednotka	význam
B1		Butan – 1 - ol
B2		Butan – 2 - ol
d	m	Tloušťka destičky
D		Dowanol
E	$\frac{J}{cm^2}$	Energie
F	N	Působící síla
g	$s \cdot m^{-2}$	Gravitační zrychlení
h	m	Výška hladiny
IPA		Izopropylalkohol
IPL		Interpenetrační vrstva
L	m	Smáčená délka destičky
MP		Methoxy- 2- propanol
w	m	Šířka destičky
$\gamma$	$N \cdot m^{-1}$	Povrchové napětí
$\Delta$		Rozdíl
$\eta$	$Pa \cdot s^{-1}$	Viskozita dynamická
$\theta$	°	Úhel mezi kapalinou se destičkou
$\rho$	$\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	Hustota
$B_o$		Bondovo číslo
M	g/ mol	Molární hmotnost
$\rho_l$	$\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	Hustota kapaliny
k		Empirická konstanta
T	°C	Teplota
$T_c$	°C	Kritická teplota

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obrázek 1: Defekt sagging[5].....	11
Obrázek 2: Defekt orange peel [6].....	12
Obrázek 3: Defekt nedostatečné IPL vrstvy .....	13
Obrázek 4: Schéma procesu lakování máčením [1].....	20
Obrázek 5: Schéma procesu lakování poléváním [2] .....	21
Obrázek 6: Schéma procesu lakování clonou [1] .....	22
Obrázek 7: Schéma metod nanášení laku pomocí atomizace [1] .....	23
Obrázek 8: Průřez lakovanou deskou .....	24
Obrázek 9: Profil visící kapky [17].....	28
Obrázek 10: Princip stanovení povrchového napětí pomocí Wilhelmyho destičky [13] ....	29
Obrázek 11: Závislost povrchového napětí na koncentraci [25] .....	30
Obrázek 12: Visící kapka systému při ředění 40: 60 hm. % lak/ rozpouštědlo .....	30
Obrázek 13: Visící kapka systému při ředění 72: 28 hm. % lak / rozpouštědlo .....	31
Obrázek 14: Goniometr s temperovací celou .....	36
Obrázek 15: Tenziometr Sigma 700 .....	37
Obrázek 16: Odpařování čistých rozpouštědel ze systému Dowanol, B1, B2 + lak .....	38
Obrázek 17: Odpařování systému Dowanol / B1 + lak .....	39
Obrázek 18: Odpařování systému Dowanol / B2 + lak .....	40
Obrázek 19: Závislost povrchového napětí systému Dowanol / B1 + lak a Dowanol / B2 + lak.....	40
Obrázek 20: Závislost povrchového napětí systému Dowanol / B1 + lak a Dowanol / B2 + lak.....	41
Obrázek 21: Odpařování čistých rozpouštědel ze systému Dowanol, B2, IPA + lak.....	42
Obrázek 22: Odpařování systému Dowanol / IPA + lak .....	43
Obrázek 23: Odpařování systému Dowanol / B2 + lak .....	43
Obrázek 24: Závislost povrchového napětí systému Dowanol / B2 + lak a Dowanol / IPA + lak.....	44
Obrázek 25: Závislost povrchového napětí systému Dowanol / B2 + lak při teplotě 25 °C a 35°C .....	44
Obrázek 26: Závislost povrchového napětí systému Dowanol / IPA + lak .....	45
Obrázek 27: Závislost povrchového napětí systému Dowanol / IPA a Dowanol / B2 + lak .....	46

**SEZNAM ROVNIC**

$$\gamma = \frac{F}{L} \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{F}{L \cdot \cos \theta} \quad (2)$$

$$\Delta p_h = \Delta \rho \cdot l \cdot g \quad (3)$$

$$B_0 \frac{\Delta \rho g R_0^2}{\gamma} \quad (4)$$

$$\gamma \left( \frac{M}{\rho_l} \right)^{\frac{2}{3}} k \cdot (T_c - T) \quad (5)$$

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1: Rozdělení metod pro měření povrchového napětí dle povrchové vrstvy .....	27
Tabulka 2: Fyzikální vlastnosti použitého UV laku při 25 °C [19] .....	34
Tabulka 3: Fyzikální vlastnosti použitých rozpouštědel při 25 °C [29] .....	35

