

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Přírodovědecká fakulta

Zařízení pro měření kontaktního úhlu

Bakalářská práce

Michal Plematl

Školitel: RNDr. Jiří Kratochvíl

České Budějovice 2019

Bibliografické údaje:

M. Plematl, 2019: Zařízení pro měření kontaktního úhlu, Bakalářská práce – 43 str., Ústav Fyziky, Přírodovědecká fakulta, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Bibliography:

M. Plematl, 2019: A device for measuring the contact angle, Bc. Thesis, [in Czech] – 43 pp., Institute of Physics, Faculty of Science, University of South Bohemia in České Budějovice, Czech Republic

Anotace:

Tato práce popisuje vývoj zařízení pro automatizované měření kontaktního úhlu kapalin s možností zaznamenávat kontaktní poloměr při schnutí roztoků a suspenzí. Práce se zabývá jednak návrhem a vývojem zařízení z hlediska hardware a software jednak jeho použitím pro měření povrchových vlastností tenkých vrstev.

Abstract:

This thesis describes the development of a device for automatic contact angle measurements of various liquids with the possibility to record contact radius during the drying of solutions and suspensions. This thesis deals either with the design and development of the device in the view of hardware and software and also with its application for measurements of thin films surface properties.

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47 b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích

dne

Podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu RNDr. Jiřímu Kratochvílovi za hezké téma, odborné vedení, konzultace, trpělivost, podnětné návrhy ohledně softwarového a hardwarového řešení, dále děkuji panu Mgr. Petrovi Rozhoňovi za spolupráci na konstrukci zařízení. Také bych rád poděkoval své rodině za trpělivost, a nejen psychickou podporu a porozumění.

Obsah

1	Úvod	7
1.1	Cíle práce	8
2	Teoretická část	9
2.1	Interakce kapalin s povrchem	9
2.1.1	Metoda přisedlé kapky	9
2.1.2	Určení povrchové energie	10
2.1.3	Metoda postupujícího a ustupujícího kontaktního úhlu	11
2.1.4	Schnutí kapky na povrchu	12
2.2	Automatizace experimentu	13
2.2.1	Krokové motory	13
2.2.2	Lineární posuv	14
2.2.3	3D tiskárna	15
2.2.4	Kamera	15
2.2.5	Softwarové vývojové nástroje	16
3	Experimentální část	17
3.1	Funkční požadavky	17
3.2	Použitý hardware	18
3.3	Vývoj dávkovače kapaliny	19
3.4	Vývoj a kompletace goniometru	21
3.5	Komunikace	26
3.5.1	Komunikace s 3D tiskárnou a kamerou	26
3.5.2	Komunikace s kamerou	27
3.6	Vývoj ovládacího softwaru	27
3.6.1	Návrh uživatelského rozhraní	27
3.6.2	Uživatelský případ: určení smáčivosti a povrchové energie	28
3.6.3	Uživatelský případ: Stárnutí povrchu	30
3.6.4	Uživatelský případ: Schnutí kapky	31
3.6.5	Uživatelský případ: Určení postup. a ustup. kontakt. úhlu	31
3.6.6	Návrh softwarové architektury	32
3.6.7	Popis jednotlivých tříd	32
3.7	Implementace programu	33
3.7.1	Asynchronní operace	33

3.7.2	Výpočet reálné polohy měřeného bodu	33
3.7.3	Výpočet minimální výšky jehly nad povrchem	35
3.8	Aplikace goniometru	36
3.8.1	Určení povrchové energie	36
3.8.2	Určení postupujícího a ustupujícího kontaktního úhlu	38
3.8.3	Schnutí kapky	38
4	Závěr	40
	Seznam použitých zdrojů	41
	Seznam obrázků	43
	Seznam tabulek	43

1. Úvod

V současnosti jsme svědky rychlého materiálového vývoje v oblastech fyziky, technologií, či biomedicíny. Jedním z nejdůležitějších parametrů materiálů jsou jeho povrchové vlastnosti, které určují, jakým způsobem bude materiál interagovat s okolním prostředím, kterým může být vodní kapka stékající po hydrofóbním povrchu nepromokavé bundy, kapka oleje na povrchu nepřilnavé pánve, tkáň kostních buněk rostoucí na povrchu biokompatibilní kloubní náhrady, či roztok analytu zasychající na povrchu biosenzoru. Pokud změníme povrchové vlastnosti materiálu, například modifikací povrchu (např. leptání, anodizace), nebo nanosením tenké funkční vrstvy (např. nanostruktury, hydrofobní povlaky), můžeme jeho vlastnosti zlepšit, či přidat vlastnosti zcela nové, a to při zachování objemových vlastností daného materiálu. Jednou se základních vlastností povrchů mimo topografie je smáčivost, která určuje sílu statické interakce kapaliny s povrchem [1].

Díky smáčivosti můžeme určit daleko obecnější parametr interakce s prostředím jímž je volná povrchová energie a její disperzní a polární část. Díky těmto parametrům můžeme odhadnout interakci povrchu nejen s různými kapalinami, ale také s jednotlivými atomy a molekulami, tělními buňkami, či bakteriemi. Interakce kapaliny s povrchem může být také dynamická, kdy se v čase mění daný systém. Typickým příkladem může být zasychání roztoku, či suspenze např. kapka kávy na stole nezasychá homogenně do plného kruhu, nýbrž do prstence, mluvíme o tzv. „coffee ringu“. Tyto dynamické jevy mají dalekosáhlé důsledky od biosenzorických aplikací, přes inkoustový tisk, po výrobu televizorů s OLED panely [2].

V praxi je smáčivost a povrchová energie měřena pomocí interakce různých kapalin s materiálem, kdy je nutné na povrch dopravit kapku kapaliny o definovaném objemu. Dynamické vlastnosti mohou být měřeny pomocí změny objemu kapky interagující s povrchem, či pozorováním zasychající kapky. Zjišťování těchto vlastností s sebou nese časově náročná měření, při kterých je potřeba precizně pracovat jednak s dávkovači kapalin (stříkačka, pipeta) jednak s kamerou či kamerami. Pokud se v rámci jednoho měření pracuje na více vzorcích nebo je měřena jejich časová stabilita jedná se tak často o řadu mnoha stejných opakujících se úkonů. Cílem této práce je nabídnout možnost tato měření zjednodušit a výrazně zpřesnit pomocí automatizovaného měření. Některá měření lze automatizovat zcela, kdy uživatel pouze zadá patřičné parametry a zařízení provede měření zcela samostatně, u jiných lze postup měření zjednodušit a díky použití automatizační techniky významně zpřesnit. Při tvorbě zařízení byl kladen důraz na jeho co největší modularitu, přenositelnost a rozšiřitelnost, což bylo zohledněno nejenom při vývoji hardwaru, ale i při tvorbě

multiplatformního řídicího softwaru. Řídicí aplikace byla navržena s ohledem na funkčnost, intuitivitu a přátelské uživatelské rozhraní, díky kterému je schopen i nezkušený uživatel měření bez problému provést.

1.1 Cíle práce

Tato práce se zabývá návrhem a tvorbou koncepčně nového zařízení, pro automatizované měření statických a dynamických povrchových vlastností materiálů a tenkých vrstev. Cíle práce vycházejí z funkčních požadavků na zařízení pro měření kontaktního úhlu vycházejících z reálných potřeb vědeckotechnických laboratoří zabývajících se fyzikou povrchů a rozhraní a technologiemi jejich přípravy:

1. Hardwarově navrhnout a sestavit zařízení jednak pro automatizované snímání kontaktních úhlů různých kapalin na různých pozicích vzorků jednak pro pořizování záznamů evoluce kontaktního úhlu a kontaktního poloměru schnoucích kapek.
2. Navrhnout a vyvinout řídicí software umožňující, časově rozlišené dávkování kapalin a pořizování záznamů kontaktních úhlů a kontaktních poloměrů.

Práce je rozdělena do třech částí, úvod čtenáři přiblíží použité vědecké metody pro měření interakce kapalin a povrchů, technologii pro automatizaci experimentu a softwarové nástroje pro vývoj řídicí aplikace. Experimentální část dává čtenáři kompletní návod pro tvorbu zařízení, ale slouží také jako podrobný manuál pro jeho použití. Vše je shrnuto v závěru, kde je také definován přínos této práce.

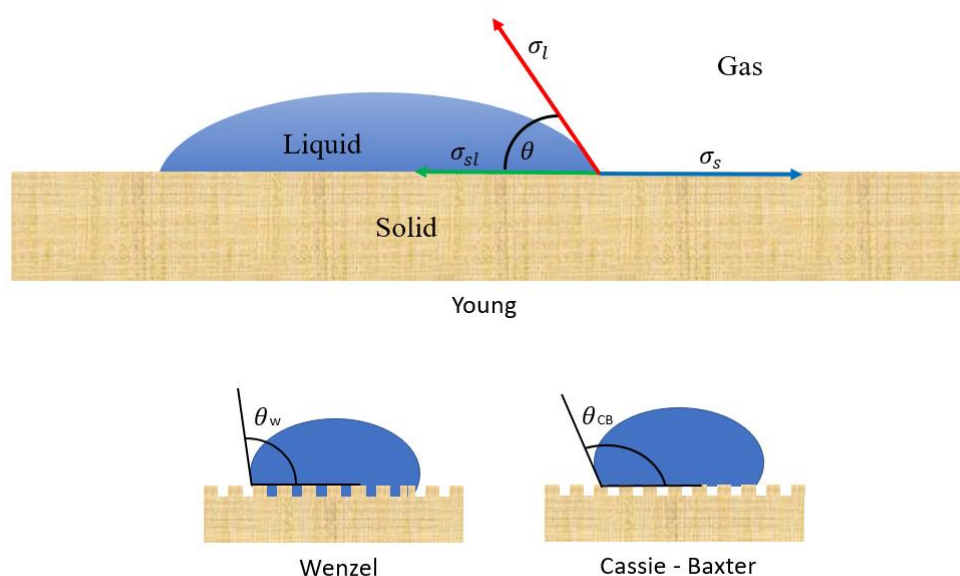
2. Teoretická část

2.1 Interakce kapalin s povrchem

Vývoj povrchů, jejichž funkčnost je založená na interakci s kapalným prostředím jde ruku v ruce s nutností fyzikálního popisu těchto interakcí. Interakce s povrchem můžeme zkoumat metodami statickými, dynamickými, kdy jsou měněny fyzikální parametry celého systému v čase.

2.1.1 Metoda přisedlé kapky

Nejjednodušší možnou metodou zkoumající interakci kapaliny s povrchem je metoda přisedlé kapky viz. **obrázek 1**. Při použití této metody je na vodorovný povrch zkoumané látky nanášena kapka, popřípadě více kapek, jedné či několika testovacích kapalin. Poté je pomocí snímací techniky pořízena fotografie tvaru kapky kapaliny z profilu. Určení kontaktního úhlu poté probíhá z tohoto záznamu. Velikost hledaného kontaktního úhlu je dána tečnou v bodě styku testovací kapaliny, plynu (vzduch) a povrchu zkoumané látky. Dle velikosti kontaktního úhlu lze rozlišit, zdali se jedná o povrch hydrofilní $\theta < 90^\circ$ či hydrofobní $\theta > 90^\circ$ [3].



Obrázek 1: Schéma přisedlé kapky, Youngův, Wenzelův a Cassie-Baxterův model

Fyzikální systém chování kapky kapaliny na vodorovném hladkém povrchu pevné látky matematicky popsal a zformuloval Thomas Young v roce 1805. Určil, jakým způsobem závisí kontaktní úhel kapaliny na rovnováze sil tří rozhraní (kapalina-pevná látka,

kapalina- plyn a pevná látka-plyn). Pro každé toto rozhraní můžeme určit povrchové napětí: σ_{sl} (kapalina- pevná látka), σ_l (kapalina-plyn), σ_s (pevná látka-plyn). Jak je patrné z **obrázku 1** pro rovnováhu sil platí vztah [4]:

$$\sigma_s = \sigma_{sl} + \sigma_l \cdot \cos\theta \quad (1)$$

Výše uvedená rovnice je platná pouze pro popis dokonale hladkého povrchu. Jakákoliv drsnost povrchu má velký vliv na smáčivost povrchu a ovlivňuje výsledný kontaktní úhel, což bylo popsáno Wenzelovým a Cassie-Baxterovým modelem. Wenzelův model je rozšíření Youngovi rovnice, pro povrchy hrubé, za předpokladu homogenního smáčení kapalinou (viz. **obrázek 1**), kdy platí vztah pro kontaktní úhel na drsném povrchu [5] :

$$\cos\theta_W = r \cdot \cos\theta, \quad (2)$$

kde r je poměr drsnosti povrchu a θ je odpovídající úhel na povrchu hladkém. Již z výše uvedeného vztahu je zřejmé, že u známých materiálů lze pomocí metody přisedlé kapky určovat drsnost povrchu.

Pokud povrch není smáčen zcela, kdy je v dutinách pod kapkou zachycen vzduch, je nutné pro popis interakce kapaliny užít obecnější model Cassie-Baxterův (viz. **obrázek 1**):

$$\cos\theta_{CB} = r_f \cdot f \cdot \cos\theta + f - 1 \quad (3)$$

kde r_f je poměr drsnosti smáčeného povrchu a f je podíl plochy povrchu pokrytého kapalinou [6]. Všimněme si, že pokud dosadíme za $f=1$, což odpovídá homogennímu smáčení, dostaneme rovnici Wenzelovu.

2.1.2 Určení povrchové energie

Abychom mohli určit volnou povrchovou energii a její polární a disperzní část, je nutné aplikovat na povrch více kapalin s různou polární a disperzní složkou povrchového napětí. Tyto hodnoty jsou pro nejpoužívanější kapaliny zapsány v **tabulce 1**.

Tabulka 1: Různé kapaliny, jejich polární a nepolární složky [7]

Kapaliny	Vzorec	Povrchové napětí	Polární složka	Disperzní složka
1-Bromonaphthalene	C ₁₀ H ₇ Br	44,4 mN.m ⁻¹ (20 °C)	0 mN.m ⁻¹	44,4 mN.m ⁻¹
Diiodomethane	CH ₂ I ₂	50,8 mN.m ⁻¹ (20 °C)	0 mN.m ⁻¹	50,8 mN.m ⁻¹
Ethylene glykol	C ₂ H ₆ O ₂	48 mN.m ⁻¹ (20 °C)	19 mN.m ⁻¹	29 mN.m ⁻¹
Formamid	CH ₃ NO	58 mN.m ⁻¹ (20 °C)	19 mN.m ⁻¹	39 mN.m ⁻¹
Voda	H ₂ O	72,8 mN.m ⁻¹ (20 °C)	51 mN.m ⁻¹	21,8 mN.m ⁻¹

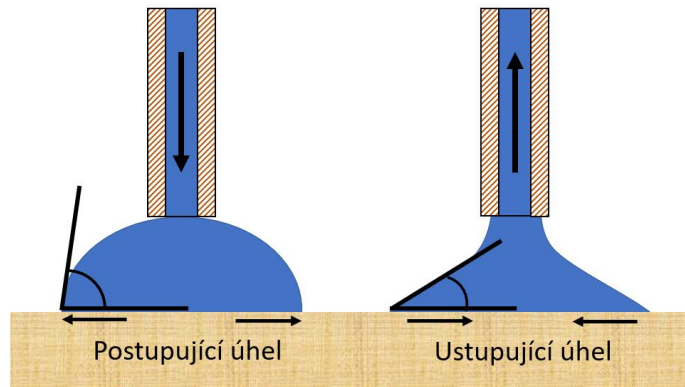
Jednou z nejpoužívanějších metod k určení volné povrchové energie a jejich složek je Fowkesova metoda. Tato metoda je založena na popisu vzájemné interakce disperzních a polárních složek mezi kapalinou a pevnou látkou (popis plochy kapky), při současném použití Youngovy rovnice (viz. **rovnice 1**), která nám definuje vztah mezi kontaktním úhlem θ a povrchovým napětím mezi jednotlivými fázemi na rozhraní kapalina-plyn-pevná látka (popis kapky na obvodu). Výše zmíněné interakce byly Fowkesem interpretovány jako geometrický průměr disperzní části σ^D a geometrický průměr polární části σ^P .

$$\sigma_{sl} = \sigma_l + \sigma_s - 2 \left(\sqrt{\sigma_l^D \cdot \sigma_s^D} + \sqrt{\sigma_l^P \cdot \sigma_s^P} \right) \quad (4)$$

Nejjednodušeji můžeme určit povrchovou energii pomocí aplikace dvou kapalin, z nichž jedna obsahuje pouze disperzní složku povrchové energie. Nejčastěji jsou používány kapaliny diiodomethane a destilovaná voda.

2.1.3 Metoda postupujícího a ustupujícího kontaktního úhlu

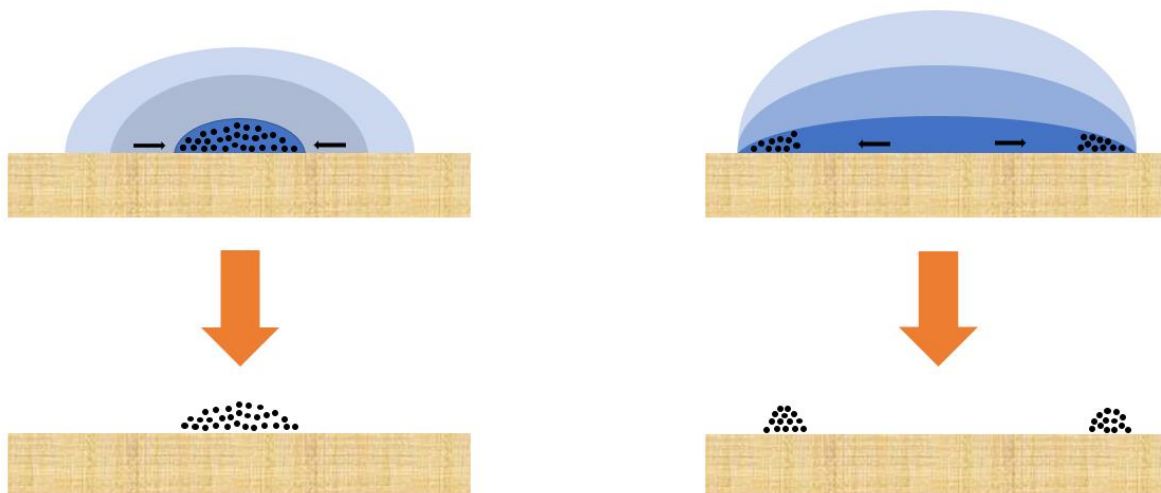
Metoda přisedlé kapky nám dává informaci o smáčivosti a povrchové energii, ale již není schopná kvantifikovat například kluzkost povrchu, tedy ochotu kapaliny pohybovat se po daném materiálu. Pro určení dynamických vlastností systému musíme použít dynamických měření, nejjednodušším a zároveň nejpoužívanějším měřením je metoda měření postupujícího a ustupujícího kontaktního úhlu jak je znázorněno na **obrázku 2**. Metoda je založena na změně objemu kapky. Existují dvě možnosti, jak změny objemu dosáhnout. První možností je objem kapky postupně zvětšovat, kdy současně dochází ke zvětšení kontaktního poloměru kapky, kapalina postupuje do míst, kde předtím nebyla, mluvíme o postupujícím kontaktním úhlu. Druhá možnost je varianta zmenšení objemu kapky, kdy dochází ke zmenšení kontaktního poloměru kapky, kapalina ustupuje z míst, kde se nacházela, mluvíme o ustupujícím kontaktním úhlu. Vzhledem k tomu, že žádný povrch není dokonale kluzký postupující kontaktní úhel nabývá vždy vyšších hodnot než kontaktní úhel ustupující, mluvíme o tzv. hysterezi kontaktního úhlu. Čím je hystereze menší, tím je povrch více kluzký, kapka má větší tendenci z povrchu stéci [8].



Obrázek 2: Postupující a ustupující kontaktní úhel

2.1.4 Schnutí kapky na povrchu

Pokud necháme na povrchu kapku dlouho, dojde k jejímu odpaření. Pokud se jedná o roztok či suspenzi dojde k odpaření kapaliny zatímco je na povrchu zanechán depozit. Fyzikální jevy probíhající ve schnoucí kapce jsou až nečekaně komplikované, molekula odpařená ze středu kapky má daleko větší pravděpodobnost návratu do kapky, než molekula, odpařená z jejího okraje, což má za následek vyšší rychlost vypařování z okraje kapky, než z jejího středu. Různý odpar je zodpovědný za tvorbu teplotního a koncentračního gradientu uvnitř objemu kapky, což má za následek tvorbu vířivého proudění uvnitř kapky Marangoniho tokem. Rychlý odpar z okraje kapky, kdy je další kapalina dodávána z jejího středu dává vznik kapilárnímu toku podél rozhraní mezi kapalinou a pevnou látkou. Kapilární tok je zodpovědný za depozici vykrystalizované látky na okraj kapky. Pokud je povrch kluzký dochází k homogenní depozici látky, pokud povrch kluzký není, kapka má stejný kontaktní poloměr a dochází k depozici látky do kružnice o kontaktním poloměru původní kapky – vzniká coffee ring [9].



Obrázek 3: Schnutí kapky roztoku, či suspenze - kluzký povrch vede k depozici do bodu, nekluzký povrch k depozici do “coffee ringu”

Měření schnoucích kapek je standardně prováděno dvěma kamerami pořizujícími videozáznam. První kamera snímá profil kapky, ze kterého je možno určit kontaktní úhel kapaliny, druhá kamera snímá kapku seshora, kdy je zaznamenávána změna kontaktního poloměru kapky a kontaktní plochy.

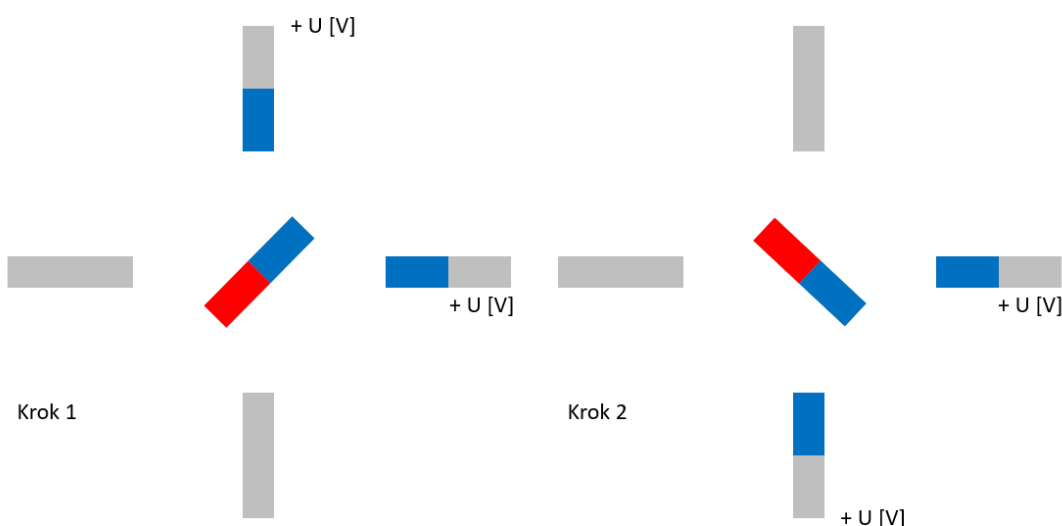
2.2 Automatizace experimentu

Průběh výše uvedených měřících metod při kterých se získávají data o chování kapalin na různých površích se vyznačuje jednak velkým objemem opakujících se operací, které zatěžují člověka značným množstvím rutinní práce, jednak požadavky na přesnost a opakovatelnost experimentu. Proto je vhodné tuto rutinní lidskou práci nahradit prací přesného stroje, čímž je navíc eliminována chyba lidského faktoru. Nezbytnými prvky přístroje jsou hardware, řídicí jednotka a ovládací software. Hardware s řídicí jednotkou musí umožnit polohování systému pomocí motorizovaných posuvů a pořizování záznamu experimentu pomocí vhodných kamer. Zatímco software musí zajišťovat komunikaci mezi uživatelem a řídicí jednotkou. V následujících podkapitolách jsou popsány vhodné hardwarové komponenty, nástroje pro jejich vývoj spolu s nástroji pro vývoj ovládacího software.

2.2.1 Krokové motory

Řídicí jednotka musí mít vždy aktuální informaci o poloze systému při jeho pozicování, což může být zajištěno vhodným senzorem, nebo volbou vhodné pohonné

jednotky – krokovým motorem. Pomocí krokového motoru dokážeme přesně nastavit potřebnou polohu a tuto polohu pak měnit či udržovat zatímco máme informaci o poloze systému. K dispozici jsou krokové motory unipolární, které mají nižší spotřebu, za cenu nižšího kroutícího momentu a pak krokové motory bipolární, které poskytují větší kroutící moment za cenu vyšší spotřeby energie. Pro naše použití jsou lepší volbou bipolární krokové motory, které nám zajistí dostatečný výkon při polohování či ovládání dávkovače kapaliny. Systém řízení krokových motorů spočívá v kontrolovaném přivádění napětí na jednotlivá vynutí statoru motoru. U námi použitých bipolárních dvoufázových krokových motorů je souhlasným napětím napájena vždy dvojice cívek vedle sebe, zatímco zbývající dvě cívky vytvářejí magnetické pole opačné polarity (viz. **obrázek 4**) [10].



Obrázek 4: Dvoufázové napájení krokového motoru

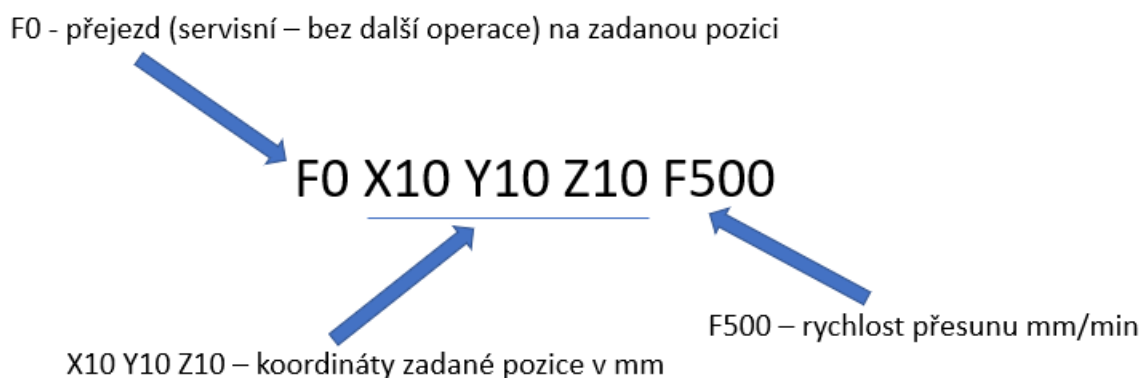
2.2.2 Lineární posuv

Jedním z nejčastějších použití krokových motorů je jejich spojení s lineárními posuvy, kdy je rotační pohyb krokového motoru změněn na pohyb translační. Pokud je preferována rychlost posunu spolu s jednoduchým systémem provozu a údržby, je vhodnou možností použít lineární posuv pomocí ozubeného řemene, nevýhodou je nepřesné polohování dané mechanickými vlastnostmi flexibilního řemene, kdy se může řemen při zatížení prodloužit. Naopak, pokud je preferována přesnost s možností většího zatížení je vhodné použít systém polohování pomocí trapézového šroubu [11].

2.2.3 3D tiskárna

Typickým zařízením kombinující lineární posuvy ve třech osách je 3D tiskárna. Při tisku je potřeba aby se extruder pohyboval ve směru os X a Y dostatečně velkou rychlostí a v ose Z s dostatečně velkou přesností, tak aby se správně prováděl tisk po vrstvách. Proto je u většiny cenově dostupných 3D tiskáren posuv o ose X a Y řešen pomocí ozubeného řemene, který zajišťuje dostatečně rychlý posun při použití jednoduché konstrukce. Pro posun v ose Z bývá použito trapézové tyče, u které je rychlost posunu mnohem nižší, ale lze dosáhnout mnohem větší přesnosti při nastavování požadované výšky [12].

Velká část 3D tiskáren využívá pro řízení různé druhy desek Arduino s nahraným firmwarem např. Repetier, či Marlin podporujícím ovládání pomocí G kódu, což velice usnadňuje další využití tiskárny jako 3D posuvu pro jiné aplikace. G kód je programovací jazyk pro CNC stroje a 3D tiskárny, pomocí kterého odesíláme instrukce pro jeho řízení. Instrukce G-code, jejíž příklad vidíme na **obrázku 5**, se skládá z instrukce pro určení, která komponenta daného zařízení má být použita a dále z koordinátů pohybu této komponenty [13].



Obrázek 5: Příklad příkazu v G kódu

2.2.4 Kamera

Pro pořizování fotografií či videozáznamu je v současnosti dostupné velké množství zařízení. Má-li se pořizovaný záznam přenášet do počítače a zároveň má-li být komunikace s tímto zařízením co nejjednodušší je vhodnou variantou webová kamera. Na trhu je k dispozici velké množství těchto kamer s různými parametry, které vychází z vlastností použitého obrazového snímače a objektivu. Obrazový snímač je zařízení citlivé na dopadající světlo, které dokáže přeměňovat na elektrický náboj, jehož dalším zpracováním získáváme digitální obraz snímaného prostředí. Důležitým parametrem tohoto zařízení je jednak

rozlišení, snímková frekvence a dynamický rozsah, což je podíl nejvyššího a nejnižšího jasu, který lze rozlišit. Další důležitou součástí kamery je objektiv – soustava čoček která slouží ke správnému nasměrování dopadajícího světla, tak aby na obrazovém snímači byl vytvořen obraz. Pro snadnou výměnu objektivu je dnes mnoho kamer vybaveno systémem CCTV S – mount. Jde o standardizovaný držák objektivů pro rychlou a pohodlnou výměnu. Jednoduchý princip celého spojení spočívá v použití závitu M12 s roztečí 0,5 mm na objektivu a odpovídajícímu vnitřnímu závitu na držáku.

2.2.5 Softwarové vývojové nástroje

Pokud nelze z dostupných součástí vytvořit požadované zařízení je třeba přistoupit k vývoji hardwaru. Hardwarové součásti jsou navrhovány pomocí 3D modelovacích softwarů, kterých je velké množství od plně profesionálních, po volně dostupné, jako byl námi použitý online nástroj Tinkercad [14], jehož výstup byl ověřen nástrojem pro kontrolu 3D modelů [15]. Pokud není třeba mechanické pevnosti a velké přesnosti výsledných hardwarových součástí, je vhodnou metodou pro prototypovací výrobu 3D tisk. Při potřebě sledování komunikace mezi počítačem a periferiemi je výhodné používat specializované softwarové vybavení, které dokáže podat vhodnou formou dostatečnou zpětnou informaci. Pro naše použití byl vhodným nástrojem program Free Serial Analyzer [16]. Ovládací software komunikující s řídicí jednotkou je možno vyvíjet v různých programovacích jazycích. Nicméně je vhodné vyvinout multiplatformní aplikaci přenositelnou na různá zařízení a na různé operační systémy. Jedním z takových programovacích jazyků je Java, kterou jsme použili pro tvorbu programu. Grafické uživatelské rozhraní jsme vytvořili za využití knihovny Swing. Pro jazyk Java existuje mnoho různých vývojových prostředí. Na výběr jsou ty nejjednodušší ve formě obyčejného textového editoru až po profesionální prostředí s velmi kvalitní nápovědou a podporou. My jsme zvolili volně dostupné vývojové prostředí s českou podporou NetBeans [17].

3. Experimentální část

Před konstrukcí vlastního zařízení, bylo nutné důkladně promyslet požadavky na měřicí přístroj, které vycházejí z jednotlivých druhů měření, které bychom chtěli realizovat, viz. **kapitola 2.1**. Po tomto úvodním a velmi důležitém kroku jsme se soustředili na návrh celkové koncepce hardwaru zařízení využívajícího co nejvíce standardizovaných a dostupných konstrukčních prvků viz **kapitola 2.2**, nicméně jsme došli k závěru, že klíčové součásti hardwaru bude nutno vyvinout, což je popsáno v **kapitole 2.3**, kdy byly tyto součásti namodelovány a naprototypovány. Jakmile jsme měli všechny komponenty připraveny přistoupili jsme ke kompletaci celého měřicího zařízení, viz. **kapitola 2.4**. Dalším, nikoliv však nejjednodušším krokem, byla tvorba ovládacího software. Nejdříve bylo třeba vyřešit komunikaci s hardwarem viz **kapitola 2.5**, poté vytvořit návrh software viz kapitola 2.6 a software naimplementovat, což je popsáno v **kapitole 2.7**. Posledním krokem bylo zařízení otestovat při měření reálných vzorků, o čemž pojednává **kapitola 2.8**.

3.1 Funkční požadavky

Při návrhu zařízení bylo potřeba vzít v úvahu všechny varianty měření, které by mohli být realizovány na námi stavěném zařízení:

1. **Metoda přisedlé kapky (kapitola 1.3.1)** vyžaduje dávkování kapaliny na definované pozice vzorku a správné umístění kamery s objektivem tak, aby bylo možné snímat s dostatečným zvětšením tvar vzniklé kapky z profilu. Tato metoda definuje funkční požadavek na použití XYZ posuvu.
2. **Metoda pro zjištění povrchové energie (kapitola 1.3.2)** je založena na nanášení minimálně dvou různých kapalin s různou disperzí a polární složkou povrchového napětí. Tato metoda definuje funkční požadavek dvou dávkovačů kapalin.
3. **Metoda postupujícího úhlu (kapitola 1.3.3)** je dynamickou metodou, která vyžaduje velmi přesné dávkování kapaliny, kdy je měněn objem kapky, která je v dotyku s povrchem a zároveň je snímán kontaktní úhel. Touto metodou je definován funkční požadavek na velmi přesnou pumpu.
4. **Metoda pozorování schnutí kapek (kapitola 1.3.4)** vyžaduje přesné umístění kapky s roztokem či suspenzí za současného velmi rychlého umístění kamer snímajících video seshora a z boku, na kterém bude zachycen celý prosc schnutí kapky

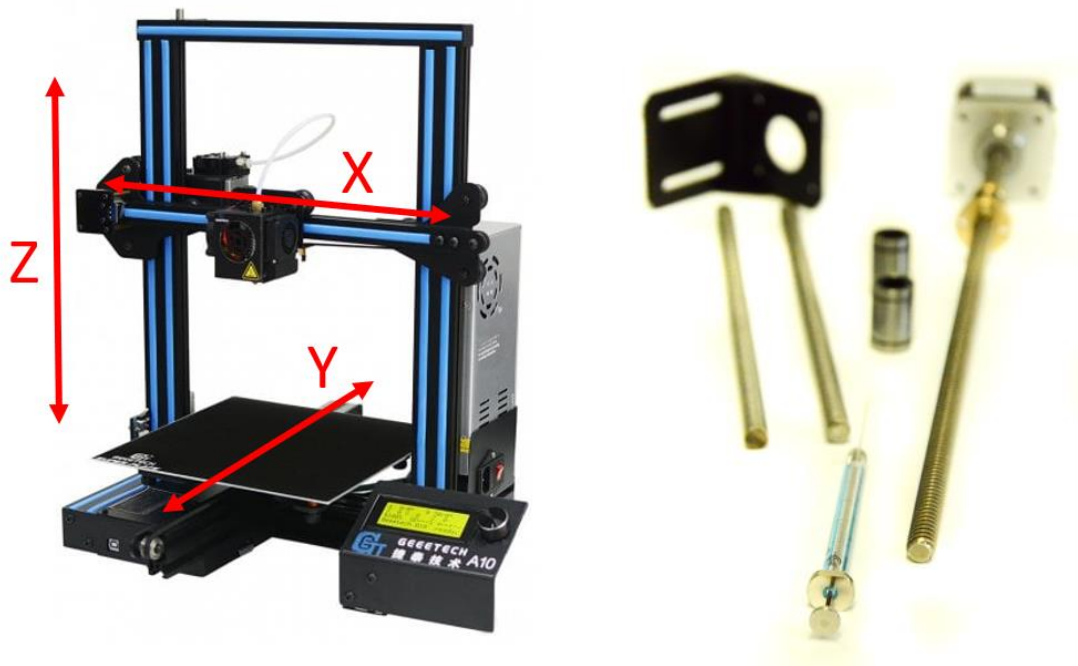
s depozitem materiálu. Metoda vyžaduje funkční požadavek dvou kamer umožňujících automatické a rychlé napozicování pro snímání schnoucí kapky.

Shrnutím všech funkčních požadavků, jsme získali jasnou představu o nutném hardwarovém vybavení naší sestavovaného měřicího přístroje. Jako nejvhodnější variantu jsme zvolili koncept, kdy je XYZ posuv realizován pomocí 3D tiskárny, kdy je místo extruderu použito dvou kapalinových pump založených na mikrostríkačce a lineárním posuvu. Vlastní snímání měření je provedeno pomocí dvou kamer, z nichž jedna je staticky umístěna z boku a druhá seshora spolu s kapalinovými pumpami založenými na mikrostríkačce. Ovládací software pak komunikuje s hardwarem pomocí G kódu a dovoluje uživateli jednoduše měřit výše zmíněné metody.

3.2. Použitý hardware

Při návrhu hardware jsme se snažili o použití dostupných hotových částí. Pro zajištění XYZ posuvu jsme pro naše zařízení zvolili jako nejvhodnější variantu koncept 3D tiskárny. Konkrétní volba padla na typ Geetech A10M (viz. **obrázek 6** vlevo), která svou konstrukcí i vybavením vyhovovala našim požadavkům na posuv a systém kontroly těchto posuvů. Jednotlivé osy posuvů jsou definovány na **obrázku 6** vlevo. Velmi důležité je, že tiskárna je kontrolována firmwarem Marlin, který lze ovládat pomocí příkazů v jazyce G-code. To byla podstatná podmínka k tomu, aby vyvíjený řídicí software mohl být přenositelný i na jiná zařízení používající stejný systém kontroly a nebyl pevně svázán pouze s jedním konkrétním zařízením. Přesnější popis, včetně všech technických parametrů je dostupný na adrese [18].

Pro dávkování kapalin byla zvolena varianta založená na mikrostríkačce s lineárním posuvem, konkrétně byla zvolena mikrostríkačka Manual Syringe SGE 250 μ l s možností výměny jehel. Dávkovač pro obsluhu mikrostríkačky je složen z několika zakoupených součástí, které jsou na **obrázku 6** vpravo, jedná se konkrétně o dvojici vodících tyčí o průměru 8 mm, k tomu přináleží dvojice lineárních ložisek, pro zajištění bezproblémového pohybu, krokový motor NEMA 17 (200 kroků na otáčku) se závitovou tyčí a trapézovým šroubem s průměrem a stoupáním 8 mm a kovového držáku pro motory NEMA 17. Tyto konstrukční prvky je třeba spojit do jednoho funkčního celku o čemž pojednává následující podkapitola vývoj dávkovače kapaliny.



Obrázek 6: Geetech A10M, díly pro vývoj dávkovače kapaliny

3.3 Vývoj dávkovače kapaliny

Důležitou částí našeho zařízení jsou dávkovače pro dvě stříkačky. Průzkum dostupných zařízení ukázal, že dávkovače, které by alespoň rámcově splňovaly požadavky pro integraci do našeho zařízení, k dispozici na trhu nejsou. Proto jsme se rozhodli pro jejich vývoj a výrobu. Prvním krokem bylo definovat si veškeré funkční požadavky, které má posun splňovat, tak abychom předešli případným problémům při běhu zařízení.

Hlavním požadavkem byla možnost ovládat stříkačku jak při vytlačování tak při nasávání kapaliny. Tento požadavek jasně definoval nutnost pevného uchycení stříkačky tak, aby bylo možno pístem pohybovat oběma směry. Zároveň s tím jsme však mysleli i na potřebu snadného vyjmutí stříkačky, ať už z důvodu výměny stříkačky, výměny kapaliny či jehly, nebo nutnosti jakéhokoliv jiného servisního zásahu na stříkačce. Dalším požadavkem, který jsme si při tvorbě posunu stanovili, byla minimalizace jeho konstrukční náročnosti, velikosti a hmotnosti. Naším cílem bylo vytvořit funkční posun, který bude oprostěn od veškerých nadbytečných součástí, které by celou konstrukci nejen komplikovaly, ale zvyšovaly by i jeho celkovou hmotnost. Výchozími rozměry, se kterými jsme začali pracovat při tvorbě návrhu se nám tak staly fixní rozměry zakoupeného hardwaru. Konkrétně jsme se zaměřili na rozměry krokového motoru, rozměry závitové tyče s trapézovým šroubem a rozměry vodících tyčí s posuvnými ložisky. Souhrnem všech výše zmíněných požadavků jsme došli k názoru, že nejlepším řešením bude vymodelovat základní prvky posunu a nechat je vytisknout na 3D

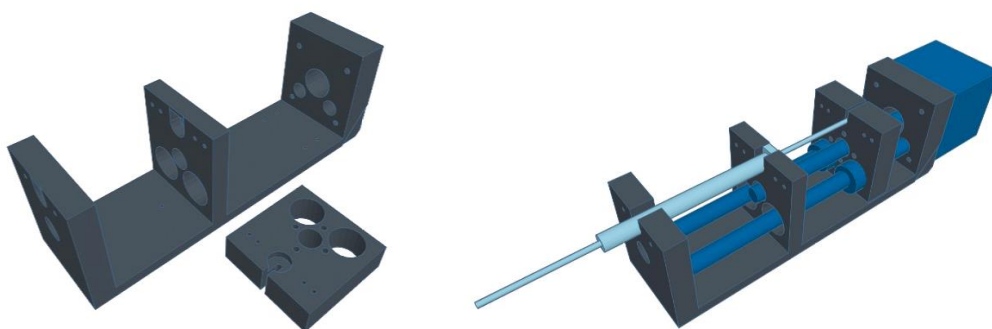
tiskárně. Tímto postupem jsme vyřešili nejenom uchycení stříkačky, ale zároveň jsme dokázali vyřešit i uchycení motoru, umístění vodících tyčí a pozicování posunu.

S lineárním posunem a krokovým motorem, který byl použit pro ovládání souvisel další důležitý úkol, stanovit si množství kapaliny, která bude vytlačena při minimálním pohybu motoru, tedy při jednom kroku motoru. Objem množství vytlačené kapaliny na jeden krok motoru V_k je dán vzorcem:

$$V_k = \frac{V \cdot s}{d \cdot k} \quad (5)$$

Kde s je stoupání trapézové závitové tyče na jednu otáčku (8 mm), k je počet kroků motoru na jednu otáčku (200), d značí délku stupnice na stříkačce (60 mm), V objem stříkačky (250 μ l). Pro hodnoty příslušející našemu hardwaru jsme došli k minimálnímu objemu 0,17 μ l.

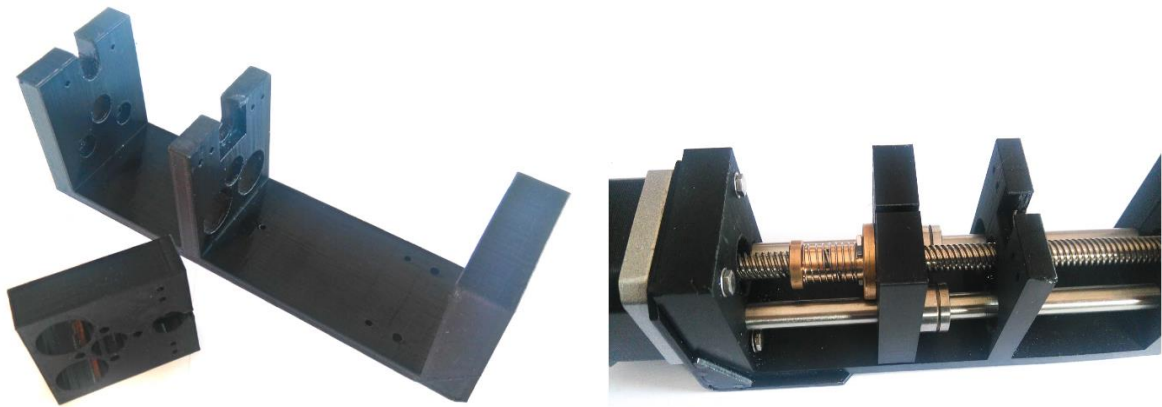
Nyní můžeme přistoupit k tvorbě samotného modelu lineárního posuvu. Modelovat byly potřeba dvě součástky, základní nepohyblivá konstrukce, ve které jsou uchyceny všechny součástky a dále část, která se bude pohybovat spolu s pístem stříkačky. Pro tvorbu modelu byl zvolen jednoduchý ale dostatečně funkční modelovací program běžící ve webovém rozhraní Autodesk TinkerCad. Modelování v tomto programu probíhá pomocí skládání základních objektů (krychle, kvádry atd.) s tím, že pokud je potřeba vytvořit výřez či průchozí otvor využívá se skládání objektů, z nichž výplň jednoho z nich je označen jako otvor. Tohoto skládání pomocí objektů jsme dobře využili při modelování průchozích a zapuštěných otvorů na závitovou tyč a vodící tyče, kdy jsme vytvořili válec o požadovaných rozměrech a tomuto jsme při slučování objektů přiřadili výplň otvor. Jak vypadaly vytvořené modely konstrukce a pojezdu je vidět na **obrázku 7** vlevo.



Obrázek 7: Modely pro tisk – návrh tisknutých dílů (vlevo) a návrh jejich uspořádání s funkčními komponenty (vpravo)

Na modelu konstrukce posuvu je možné si povšimnout dvou ploch, které by zabráňovaly vložení stříkačky. Jedná se o podpory, které jsou potřebné pro úspěšné provedení 3D tisku a po vytištění byly odstraněny. Ke tvorbě modelu je potřeba ještě dodat, že veškeré rozměry vnitřních otvorů bylo potřeba modelovat s odchylkou + 0,5 mm. Důvodem je roztažení materiálu při 3D tisku. Na **obrázku 7** vpravo je možno vidět, jak vypadal kompletní 3D model, obsahující i části, které pak byly nahrazeny reálnými objekty (stříkačka, motor, vodící tyče atd.)

Výsledné očištěné modely vytištěné na 3D tiskárně, před kompletací jsou na **obrázku 8** vlevo. Při výsledné kompletaci posuvů pro stříkačky bylo nutné dbát zvýšené opatrnosti na přesné sesazení jednotlivých komponent tak, aby se předešlo nechtěnému tření nebo dokonce k nárazům jednotlivých komponent při posuvu. Bylo také nutné zvolit správné pořadí v jakém byli komponenty montovány. Předešli jsme tak problémům, které mohly vzniknout vzhledem k minimalistickému řešení celého posuvu. I když je 3D tisk poměrně přesný bylo nutné v několika místech tištěné modely zabrousit, aby byla výsledná kompletace bezproblémová. Posuv byl ještě doplněn o kovový držák pro krokový motor, jenž byl vložen mezi krokový motor a horní desku posuvu. Důvodem proč jsme tuto komponentu zařadili do celkového sestavení byla snaha o zpevnění uchycení posuvu viz. **kapitola 2.4**. Výsledný posuv je na **obrázku 8** vpravo.



Obrázek 8: Vytištěné 3D modely a zkompletovaný finální posuv

3.4 Vývoj a kompletace goniometru

Poté co jsme vyřešili posuv pro stříkačky, soustředili jsme se na celkové kompozici měřicího přístroje. Jak již bylo uvedeno v předchozí **kapitole 2.1**, potřebovali jsme, aby na

goniometru byly umístěny dva polohovatelné posuny pro stříkačky a dvě kamery tak, abychom dokázali kapku interagující s testovaným materiálem zabírat jak z bočního pohledu tak z pohledu shora.

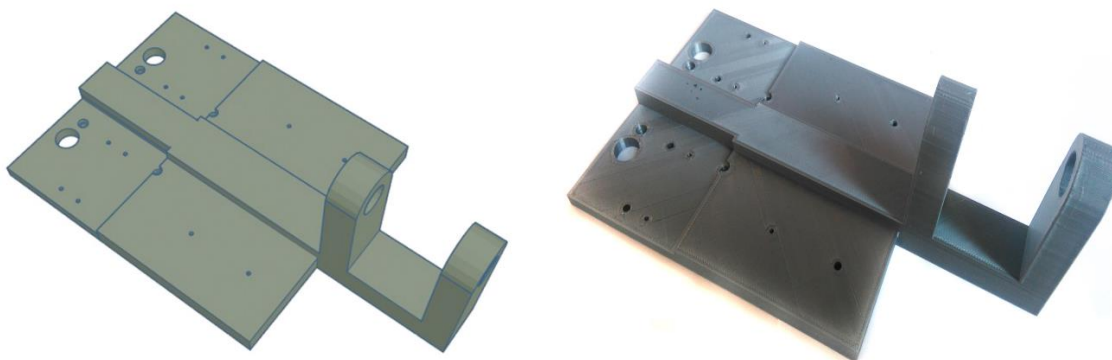
Výchozím stavem pro nás byla 3D tiskárna Geetech A10M. Prvním krokem bylo z tiskárny odebrat veškerý nepotřebný hardware. Odmontovány tak byly oba motory pro posun filamentu s veškerým vybavením, držáky pro zásobníky na materiál pro 3D tisk a nakonec i samotný extruder s veškerou elektronikou k němu příslušící, jenž byl umístěn na pojezdu ve směru osy X. Tím jsme získali motorizovanou konstrukci 3D posuvu se kterou jsme mohli dále pracovat.

Dalším krokem bylo vyřešit umístění posuvů pro stříkačky a spolu s nimi i umístění horní kamery. Jednoznačným zadáním funkčnosti goniometru bylo nutné zajistit pro všechny tři komponenty pohyblivost jak v ose X, Y, tak v ose Z. Zaměřili jsme se proto na pojezd, jenž původně nesl extruder. Bylo nutné navrhnout systém zavěšení, tak aby co nejvíce vyhovoval našim požadavkům. Při řešení tohoto problému jsme se rozhodli využít opět možnosti 3D tisku. Tato možnost se jevila jako nejvhodnější a dávala nám možnost přesného rozložení montážních bodů jednotlivých součástek.

Jak tedy vypadal návrh a modelování nosné desky spojující 3D posuv, horní kameru a posuvy stříkaček? Prvně bylo třeba vyřešit rozmístění součástek s ohledem na jejich co nejjednodušší a nejrychlejší polohování. Pro minimalizaci složitosti ovládání při najíždění kamery nad právě odkápnutou kapku je výhodné kameru spolu s jehlami stříkaček mít v jedné rovině, poté není nutné při této manipulaci hýbat stolcem (polohování osy Y). Pokud by se muselo pracovat i se stolcem, vedlo by to k nežádoucím efektům přenosů vibrací na kapku nanesenou na zkoumaný povrch. V úvahu přicházely dvě možnosti co nejkompaktnějšího uspořádání komponent v jedné rovině, buď posuvy stříkaček umístit vedle sebe a na jednu ze stran pak následně umístit kameru, nebo kameru umístit mezi posuvy, což se ukázalo jako vhodnější řešení. Díky tomuto symetrickému umístění jsme dosáhli optimálnějšího rozložení zatížení pojezdu. Hmotnost posuvů vzhledem k hmotnosti kamery je zřetelně vyšší a mohlo by tak docházet k nerovnoměrnému působení sil, což by mohlo vést ke zhoršení pohyblivosti či až k zablokování posuvu. Další výhodou tohoto umístění byla možnost rychlejšího polohování kamery nad právě kápnutou kapku, neboť střední vzdálenost, kterou musí pojezd urazit po kápnutí je v tomto uspořádání mnohem menší, oproti uspořádání kamery na jednu ze stran. V neposlední řadě muselo být navrženo vertikální uspořádání komponent, tak aby

nedošlo k nárazu jehly do vzorku či stolku při polohování kamery při současném zachování správného zaostření obrazu.

Vznikl tak výsledný model (viz. **obrázek 9** vlevo), který je výsledkem mnoha postupných úprav vyplývajících z výše uvedených důvodů. Jak je na obrázku vidět, snažili jsme se i zde zachovat minimalistické řešení celku, stejně jako u tvorby posunů pro stříkačky. Zapuštění, jež je vidět v horní části modelu je prostor pro kovovou výztuhu posuvů viz. **kapitola 2.3**.

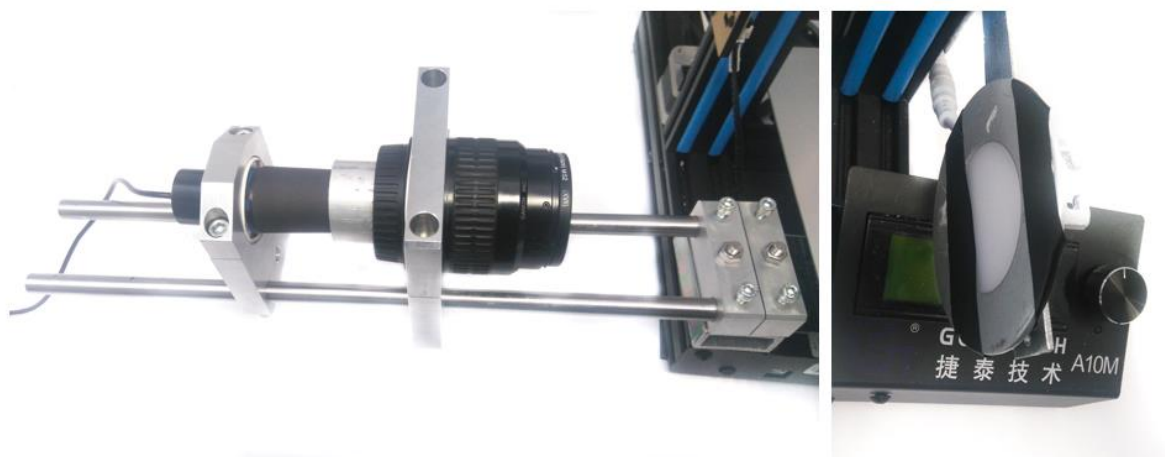


Obrázek 9: Model základní desky a vytištěná základní deska

Poslední, na co bych rád na modelu ještě upozornil je konstrukční řešení zpevnění nosných prvků pro kameru. Z obrázku je patrné, že nosné prvky kamery jsou oproti zbytku modelu velmi vysoké a i když kamera nebude působit velkými silami, mohlo by časem dojít k materiálovému opotřebení vedoucí až o odlomení některé z těchto částí. Proto jsou v obou těchto prvcích vytvořeny otvory pro zapuštění šroubů M3, které celou konstrukci zpevní a zajistí celkově vyšší odolnost vůči mechanickému namáhání. Na **obrázku 9** vpravo je vidět vytištěná základní deska.

Po vyřešení uchycení posuvu stříkaček a horní kamery jsme se začali věnovat bočnímu záznamovému zařízení, které má poskytovat kontrastní zvětšené a nezdeformované snímky přisedlých kapek. Standardní objektiv webkamery nelze z těchto důvodů použít, proto bylo třeba nejdříve tento objektiv demontovat a nahradit ho objektivem kvalitnějším. Byl vybrán profesionální objektiv s relativně dlouhou ohniskovou vzdáleností (Canon EF s ohniskovou vzdáleností 35-80 mm, zorným úhlem $63,5^\circ - 30,3^\circ$ a maximální clonou f/4) pro použití s fotoaparáty s velkým čipem, díky čemuž bylo vyřešeno i zvětšení, jelikož ccd čip naší webkamery byl mnohonásobně menší. Uchycení webkamery (bez objektivu) a objektivu bylo realizováno na pojezdu, což nám umožnilo nezávisle měnit vzdálenost jak objektivu, tak

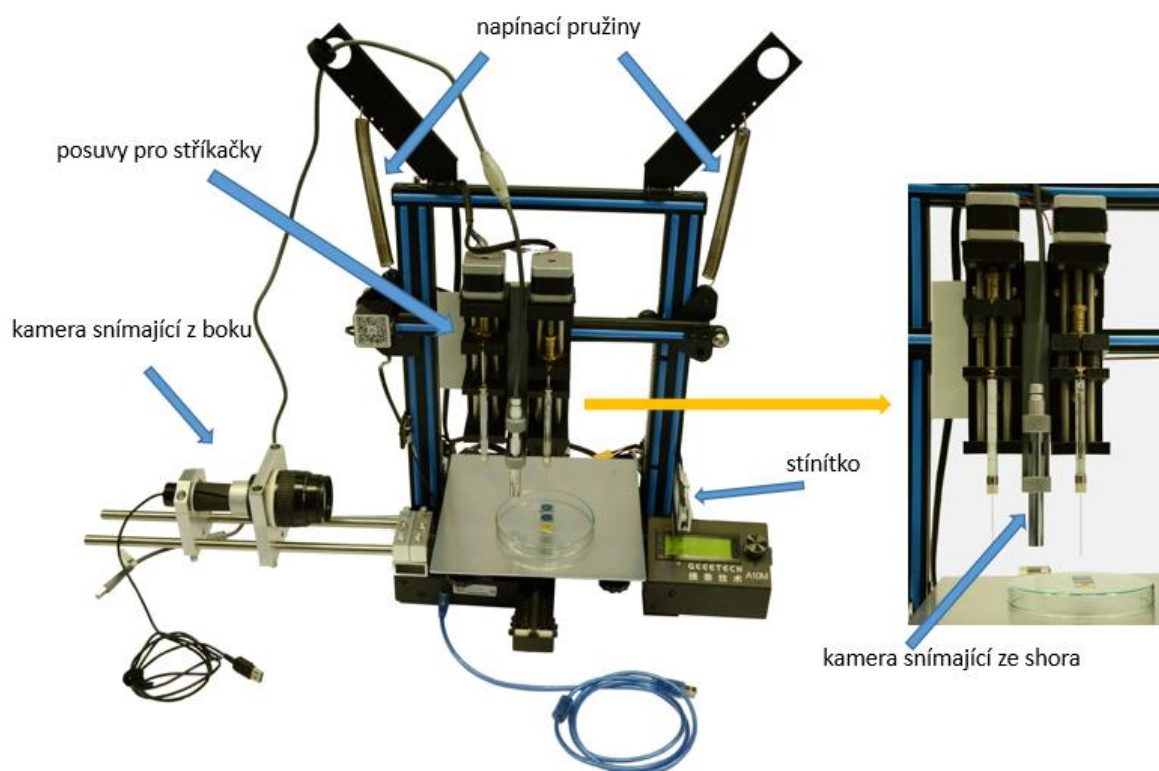
kamery vzhledem ke snímané kapce a tak dosáhnout požadované kvality záznamu. Celá konstrukce uchycení kamery je zachycena na **obrázku 10** vlevo. Abychom dosáhli kontrastních snímků okraje kapky, bylo nutné přidat na protější stranu plošný světelný zdroj (viz. **obrázek 10** vpravo).



Obrázek 10: Konstrukce uchycení kamery a plošný světelný zdroj

Po dokončení vývoje hardwarových součástí, bylo nutné zařízení sestavit. Po zapojení motorů 3D pojezdu tiskárny a sešroubování mechanických částí bylo nutné provést několik úprav. Nahrazením extruderu dávkovači kapaliny a kamerou jsme změnili rozsahy možného vertikálního posuvu Z a postranního posuvu X, proto bylo nutné to upravit pozici dojezdů, které 3D tiskárna používala k dojezdu na domovskou pozici, tedy pozici, ve které jsou pro řídicí systém hodnoty všech os nastaveny na nulu. Pokud bychom nechaly především pojezd v ose Z v původních místech uložení mohlo by dojít k destrukci jehly ve stříkačce či dokonce k destrukci celé stříkačky při pokusu dojet na domovské pozice. Možnost tento pojezd zcela z 3D tiskárny odstranit nebyl také možný, bez něj bychom totiž nedokázali určovat pozici posuvu v prostoru. Určili jsme proto minimální bezpečnou výšku do které je možno nechat pojezd na ose Z zajíždět a zde jsme umístili dojezd pro osu Z. Zbývající dva dojezdy, tedy dojezd pro osu X, po které se pohybují posuvy pro stříkačky a dojezd pro osu Y, po které se pohybuje stůl, mohly po kontrole a přeměření zůstat tak, jak byly původně umístěny. Výše uvedenými úpravami byl hardwarově dokončen 3D posuv jednotlivých měřících nástrojů. Zatímco vlastní 3D posuv měl již vyřešené řízení motorů, u pohonu motorů stříkaček byla situace složitější. Tiskárna byla záměrně zakoupená s dvěma bipolárními motory NEMA17, které sloužily pro podávání filamentu do extruderu, stejné motory ale s integrovanou

trapézovou tyčí byly zakoupeny pro motorizaci dávkovače kapalin. Díky tomuto řešení nebylo nutné vyvíjet zvláštní řídicí jednotku a mohla být použita řídicí jednotka tiskárny i pro posuv pístů stříkaček. Po všech těchto zásazích, byl goniometr dokončen z hlediska hardware, (viz **obrázek 11**).



Obrázek 11: Fotografie finálního goniometru s popisem

Na hotovém goniometru (viz. **obrázek 11**) stojí za povšimnutí ještě jeden zajímavý konstrukční prvek a to napínací pružiny na obou stranách goniometru. Jejich účelem je zajišťovat stabilitu pojezdu v ose Z a zabránit tak nechtěnému sjetí celé konstrukce posuvu pro stříkačky, čímž by mohlo dojít k poškození či zničení vložených stříkaček. Díky otvorům v různých výškách zavěšení lze dosáhnout různého napnutí pružin, a tak regulovat síly, kterými na pojezd pružiny působí.

Hotové modely pro 3D tisk dílů posuvu a základní desky pro jejich montáž na tiskárnu jsou na přiloženém CD v adresáři: „Modely 3D tisk“.

3.5 Komunikace

Abychom mohli přejít k tvorbě ovládacího software, bylo třeba nejdříve jednotlivé funkční hardwarové části rozchodit pomocí standardního software. Poté bylo nutné naučit se komunikovat s kamerami a s řídicí jednotkou ovládající jednotlivé motory, tak aby je bylo možné ovládat pomocí programovacího jazyku Java.

3.5.1 Komunikace s 3D tiskárnou a kamerou

Nejdříve bylo nutné rozpohybovat tiskárnu a vyřešit komunikaci s její řídicí jednotkou, která ovládala nejen 3D posuv, ale také lineární posuvy pístů stříkaček. Prvním krokem byla instalace ovladače 3D tiskárny. Výrobce 3D tiskárny distribuuje na svých stránkách ovladače, které je nutné před připojením nainstalovat do počítače. Je zde potřeba být opatrný, neboť námi zvolená 3D tiskárna může být vybavena dvěma různými čipy, konkrétně se jedná o čipy CH 340 a FT232 a každý z čipů vyžaduje své vlastní ovladače. Pokud instalaci provedeme korektně je po připojení 3D tiskárny pomocí USB kabelu, vytvořen virtuální sériový port přes který pak probíhá komunikace. Bohužel ovládací software, který doporučuje výrobce a my jej chtěli využít k prvotnímu testování nebyl příliš funkční a museli jsme jej nahradit volně dostupným softwarem Printron [19], který byl již schopen řídit jednotlivé motory. Klíčové bylo vyřešit komunikaci skrze programovací jazyk Java. V prvním kroku jsme odchytili komunikaci mezi PC a 3D tiskárnou pomocí programu Free Serial Analyzer, kdy jsme na 3D tiskárnu posílali jednotlivé G-code příkazy pomocí programu Printron. Dále bylo nutné provést testy, zda a jak se dá přistupovat k motorům určeným pro pohyb filamentu, které byly použity pro pohyb pístu stříkačky. Nakonec jsme úspěšně našli sadu G kódových příkazů pomocí nichž bylo možné kontrolovat chod motorů podle našich představ.

Pro úplnost uvádím v **tabulce 2** několik příkladů G kódů, pomocí nichž je ovládán pohyb 3D tiskárny a zároveň posuvy pro jednotlivé stříkačky.

Tabulka 2: Příklady příkazů v G kódu [13]

Nastavení absolutních hodnot pozicování	G90
Nastavení relativních hodnot pozicování	G91
Posun po ose X o 10 mm rychlostí 50 mm/min	F0 X10 F50
Posun po ose X o 10 mm, Y o 5 mm rychlostí 100 mm/min	F0 X10 Y5 F100
Volba posuvu stříkačky (levá, pravá)	T0 a T1
Posun stříkačky o 5 mm rychlostí 50 mm/min	G0 E5 F50

Díky datům, které jsme získali sledováním komunikace mezi externím programem a 3D tiskárnou jsme byli schopni upravit nastavení portu v Javě a vést dále komunikaci, která spočívá v opakovaném čtení z portu až do okamžiku, kdy 3D tiskárna odešle kombinaci znaků „ok.“. Takto 3D tiskárna potvrzuje dokončení prvotního přihlášení k počítači či vykonání posledního obdržného příkazu a připravenost přijímat další data. Důležité bylo také zjištění, že na konec každého řádku G kódu je potřeba vložit kombinaci znaků „/n“, kterými se řada dat odesílaných na 3D tiskárnu ukončuje.

3.5.2 Komunikace s kamerou

Komunikace webkamer s počítačem je zajištěna přes standartní USB rozhraní. Po připojení přes USB kabel je kamera viditelná v systému a lze s ní bez větších problémů komunikovat. Komunikaci s kamerami zajišťují implementované knihovny v programu Java. Jedná se konkrétně o knihovnu Webcam Capture API [20], pomocí které byly realizovány streamy z jednotlivých kamer a o knihovnu JxCapture [21], která byla použita pro pořizování fotografií a videozáznamů.

3.6 Vývoj ovládacího softwaru

Po zvládnutí komunikace bylo třeba přejít k vývoji ovládacího software, který byl navržen na základě funkčních požadavků pro jednotlivé měřící metody.

3.6.1 Návrh uživatelského rozhraní

Na základě těchto požadavků byly rozpracovány drátěné modely (wireframes) aplikace s ohledem na co nejlepší uživatelskou přívětivost (user experience - UX), které byly poté testovány na budoucích uživateli daného zařízení. Zpětná vazba od těchto budoucích uživatelů byla zapracována do návrhu uživatelského rozhraní, jehož finální podoba je vidět na **obrázku 12**, kde barevné šipky znázorňují možnosti přechodu mezi jednotlivými okny, zelené šipky znamenají posun vpřed, červené naopak krok zpět.

Aplikace je navržena, tak, aby uživatele provázela jednotlivými úkony - uživateli jsou servírovány jednotlivé úkoly postupně, tak aby nebyl zahlcen informacemi. I nezkušený uživatel zařízení je tak schopen daná měření bez problému provést. Velký důraz je kladen na katalogizaci jednotlivých měření, kdy jsou automaticky generovány názvy souborů. Podívejme se nyní na příklady možných uživatelských případů, kterými jsou jednotlivé měřící metody.

Po otevření programu, uživatel začíná na **obrazovce 1**, kde probíhá prvotní nastavení programu. Úvodní volba se týká připojení 3D posuvu (tiskárny). K dispozici je rozbalovací nabídka s výběrem dostupných portů. Dojde-li po zmáčknutí tlačítka Connect k úspěšnému připojení změní se popis tlačítka na Disconnect a jeho funkce se změní na odpojení od 3D posuvu. Pokud k úspěšnému připojení nedojde, zůstává tlačítko v popisu a funkci Connect. Druhá volba se týká výběru disku a adresáře do kterého budou ukládány pořízené fotografie popřípadě videa během měření. Následuje výběr názvů kapalin, které byly vloženy do prvního, druhého či obou posuvů. Uživatel má v tomto výběru dvě možnosti. Buď volí předdefinovanou kapalinu z rozbalovací nabídky, nebo si zvolí nabídku „My liquid“ a do připraveného pole napíše vlastní pojmenování kapaliny. K tomuto výběru je potřeba přidat dvě poznámky. Za první, název kapaliny je používán při ukládání dat, tak aby bylo jednoznačně určeno o záznam kterého experimentu se jedná. Za druhé, pokud uživatel nezvolí ani v jednom nastavení název kapaliny a nechá tak obě ve výchozím stavu „No liquid“ nebude možné přejít do dalšího okna, tlačítko Next se aktivuje pouze pokud je zvolena alespoň jedna použitá kapalina. Ve druhém okně **obrazovka 2** se uživatel pouze rozhoduje zda bude používat manuální či automatické měření.

Pro měření smáčivosti a povrchové energie si uživatel zvolí automatickou kontrolu viz. **obrazovka A1**. V tomto okně je dispozici náhled z horní kamery a ovládací panel pro kontrolu pohybu ve všech třech osách. Můžeme si tak velmi jednoduše a pohodlně nastavit kameru nad materiál tak, aby měl co nejlepší pohled. Jakmile je s nastavením kamery spokojen, může začít s výběrem bodů (klikáním myši do okna kamery), na které bude kápnuto. Pozor, v tomto místě je potřeba upozornit, že se ovládací panel pro 3D posuv deaktivuje jakmile je zakliknut první bod. Pro jeho opětovnou aktivaci je potřeba všechny zadané body odstranit, což můžeme provádět individuálně pro jednotlivé body, nebo jedním tlačítkem, které smaže všechny zadané body. Pro každý bod, který byl označen se vedle okna kamery vytváří řádka obsahující následující údaje: název vzorku, notifikace pozice X a Y vzhledem k oknu kamery, pole pro výběr použité kapaliny (seznam je naplněn dle zadání názvů kapalin z **obrazovky 1**, pole je editovatelné pouze v případě použití obou stříkaček), nastavení objemu kapky, nastavení času kápnutí, rozbalovací nabídka s časovými jednotkami a tlačítko delete pro smazání bodu. Aby nebyl uživatel zatěžován opakovaným vypisováním totožných údajů, vyplňuje se každý editovatelný údaj další bodu s nastavením, které měl bod předešlý.

Poté, co jsou zadány všechny body lze již přejít na další **obrazovku A2**, která slouží ke správnému nastavení výšky nad měřeným vzorkem, pro nanášení kapky na testovaný

materiál. Uživatel vidí pohled s boční kamery, do kterého jsou vkresleny dvě vodorovné čáry. První určuje teoretickou výšku povrchu, druhá určuje maximální výšku konce jehly nad povrchem. Tato výška je spočítána dle nejmenšího zadaného objemu kapky, jež zadal uživatel v předešlém okně. Uživatel pomocí ovládacího panelu sjede s jehlou pod tuto výšku, čímž je zaručeno, že kapka ulpí na povrchu. V okamžiku kdy je uživatel spokojen s nastavením může spustit měření tlačítkem „Start“, čímž je zahájeno měření. Důležité je říci, že výsledné záznamy budou uloženy ve formátu:

[materiál]_[kapalina]_[objem]_[rok]_[měsíc]_[den]_[hodina]_[minuta]_[sekunda]

Tímto formátem ukládání je zabráněno nechtěnému přepisu pořízeného záznamu, navíc má uživatel úplný přehled o následnosti pořízených záznamů. Jako příklad tohoto systému ukládání dat uvádíme možné měření, kdy byla na PTFE materiál kapána voda. Pořízená data by pak mohla mít následující název:

[PTFE]_[Voda]_[2ul]_[2019]_[04]_[08]_[13]_[54]_[28]

3.6.3 Uživatelský případ: Stárnutí povrchu

Přeskočíme **obrazovku 1**, její popis je dostupný v prvním uváděném případě (určení smáčivosti a povrchové energie). Na **obrazovce 2** zvolíme opět automatickou kontrolu. Nastavení na **obrazovce A2** probíhá zcela stejně jako v předešlém případě. Důležité však je, ještě jednou se zastavit u časových údajů, které jsou nastavovány u každého. Tento časový údaj značí dobu, která uběhne mezi začátkem měření a nanesení dané kapky. Při nastavení času si uživatel může volit buď minuty nebo hodiny. Důvody, proč nejsou použity i sekundy jsou dva. Prvně je to příliš krátký čas, který z hlediska prováděného měření nemá opodstatnění (doba, za kterou se právě vytvořený vzorek dostane do zařízení je vždy v řádech minut, nikoliv sekund, proto následné měření v takto nízkých časových rozestupech postrádá smysl). Druhým velmi důležitým důvodem je časové zpoždění zařízení. Problémem je rychlost polohování na jednotlivé body na vzorku. Experimentálně jsme si ověřili, že rychlost posunu na různá místa se pohybuje v řádech desítek sekund, dle vzdálenosti místa a nebylo by proto technicky možné provádět měření v sekundových rozestupech.

Pro měření na která je měřící přístroj stavěn je proto vhodné nastavovat čas kápnutí v minutách či v hodinách, typicky jsou voleny geometrické časové řady např.: (0 min, 15 min, 30 min, 1 hod, 2 hod, 4 hod, 8 hod, 16 hod). Pokud by se uživatel rozhodl nevyplňovat u bodů časové údaje, provede přístroj měření v co nejkratším možném čase, tedy kápnutí a pořizování

záznamu bude pokračovat bez jakéhokoliv čekání. Postup v na **obrazovce A2** je již zcela totožný s předchozím případem (určení smáčivosti a povrchové energie) a není proto nutné jej znovu opakovat.

3.6.4 Uživatelský případ: Schnutí kapky

Další možností měření na přístroji je zjišťování chování kapaliny při schnutí. V tomto případě se musí uživatel přepnout do manuálního ovládání **obrazovka M1**. Popis prvních dvou oken **obrazovka 1** a **obrazovka 2** již neuvádíme, je zcela totožný s popisem v předešlých případech.

Na **obrazovce M1** má uživatel plnou kontrolu nad všemi funkčními prvky měřicího zařízení (3D posuv, obě kamery, oba posuvy pro dávkování kapalin). Pomocí ovládacích tlačítek pro kontrolu 3D posuvu (s označením začínající X, Y a Z), které jsou uspořádány vlevo dole si může uživatel nastavit patřičnou polohu stříkačky nad testovaný materiál. Vpravo od kontroly 3D posuvu jsou umístěny ovládací prvky pro kontrolu posuvu stříkaček. Uživatel si může zadávat dávkování kapaliny ručně (tlačítka s označením začínající na L, R indikující výběr dávkovače left, right), nebo zadat hodnotu v mikrolitrech a nechat kápnout přístroj automaticky. Mezi kamerami jsou mimo textové pole s názvem vzorku také prvky pro ovládání záznamu. Na výběr je pořízení fotografie, nahrávání videa s kontrolou od uživatele (start a stop určuje uživatel) a nahrávání videa o předem určené délce.

Vraťme se nyní k našemu příkladu, tedy měření schnutí kapky. Při tomto měření je potřeba použít kameru snímající vzorek seshora. Uživatel by si měl, poté co vyplní název materiálu na který budeme kapat, nastavit a zaostřit kameru. Ostření probíhá ručně přímo na těle kamery, nastavování výšky nad materiálem pomocí ovládání (tlačítka začínající označením Z). Jakmile je uživatel spokojen uloží si nastavenou výšku pomocí tlačítka „Store Look Height“. Nyní si může najet nad testovaný materiál a provést samotné kápnutí. Aby se zabránilo zbytečné prodlevě a případným problémům při zpětném nastavení kamery nad kapku, je pod tlačítkem „Store Look Height“, které jsme již používali, umístěno tlačítko „Look At Last Drop“, po jehož stlačení se kamera nastaví automaticky nad kapku do uložené výšky. Nyní již uživatel pouze zapne nahrávání a zaznamená průběh schnutí.

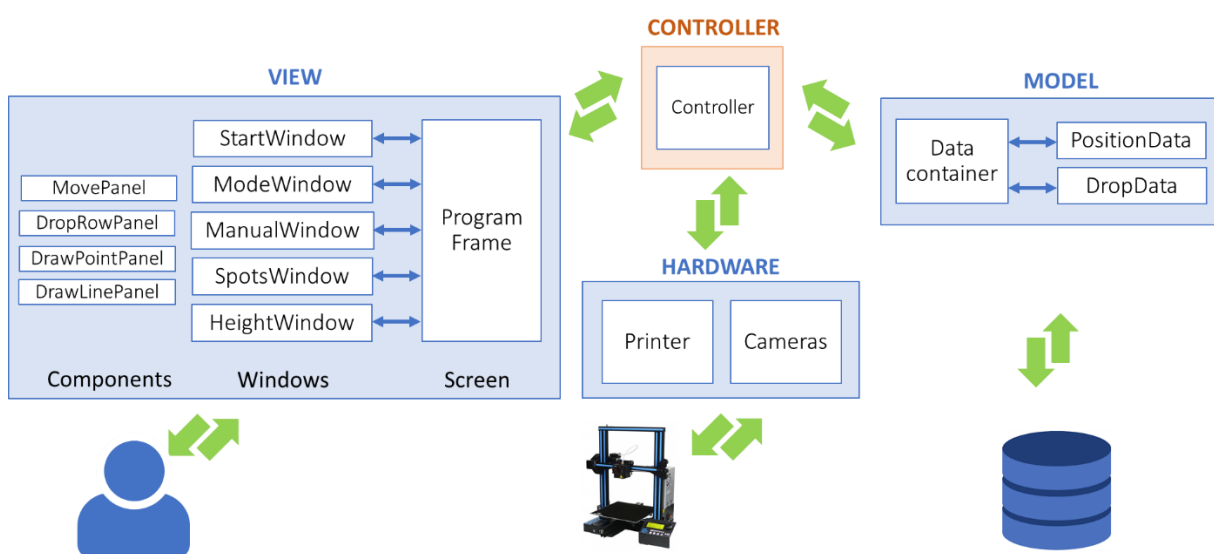
3.6.5 Uživatelský případ: Určení postupujícího a ustupujícího kontaktního úhlu

Poslední možností je měření postupujícího a ustupujícího úhlu. Uživatel k tomuto měření bude používat manuální ovládání **obrazovka M1**. První dvě okna **obrazovka 1** a **obrazovka 2** opět přeskočíme. Na **obrazovce M1** si uživatel pomocí ovládacích tlačítek

pro kontrolu 3D posuvu nastaví patřičnou polohu a výšku stříkačky nad testovaným materiálem. Poté může ručně či automaticky provádět dávkování vytlačování či nasávání kapaliny a toto zaznamenávat boční kamerou.

3.6.6 Návrh softwarové architektury:

Po návrhu uživatelského rozhraní bylo třeba navrhnout softwarovou architekturu. Vyšli jsme ze standardního modelu pro programování uživatelského rozhraní Model-View-Controller (MVP), kdy jsme controller rozšířili o funkce pro řízení hardwaru. Objektový návrh programu, který byl tvořen s ohledem na co největší přehlednost a rozšiřitelnost je znázorněn na **obrázku 13**.



Obrázek 13: Architektura programu – propojení tříd

3.6.7 Popis jednotlivých tříd

Nyní přistupme k popisu funkcí jednotlivých tříd, které můžeme přiřadit do skupin dle jejich funkce:

Controller: Velmi důležitá třída controller, zajišťuje komunikaci mezi třídami zobrazení (View), datovými třídami (Model) a třídami starajícími se o obsluhu 3D posuvu (Printer) a kamer (Cameras), se kterými komunikuje vždy přes rozhraní (Interface).

Skupina View: Hlavní okno programu ProgramFrame, do kterého jsou zobrazovány jednotlivé obrazovky (StartWindow – obrazovka 1, ModeWindow – obrazovka 2, ManualWindow – obrazovka M1, SpotsWindow – obrazovka A1,

HeightWindow – obrazovka A2). V jednotlivých obrazovkách jsou poté využívány jednotlivé komponenty (MovePanel – panel pro manuální kontrolu posuvu, DropRowPanel – panel pro nastavení parametrů měřících bodů, DrawPointPanel – panel překrývající okno streamu horní kamery umožňující naklikání bodů pro měření, DrawLinePanel – panel překrývající okno streamu boční kamery umožňující nastavení výšky jehly)

Skupina Hardware: Obslužná třída Printer zajišťuje připojení, odpojení a komunikaci s 3D tiskárnou pomocí odesílání povelů v G kódu. Třída Cameras zajišťuje tvorbu fotografií, pořizování videozáznamu a poskytující stream pro okna obslužného programu.

Skupina Model: Třída DataContainer umožňuje uchování všech potřebných dat pro běh programu. DataContainer využívá třídu PositionData pro uložení aktuální pozice 3D posuvu a DropData pro uchování jednotlivých měřících bodů.

3.7 Implementace programu

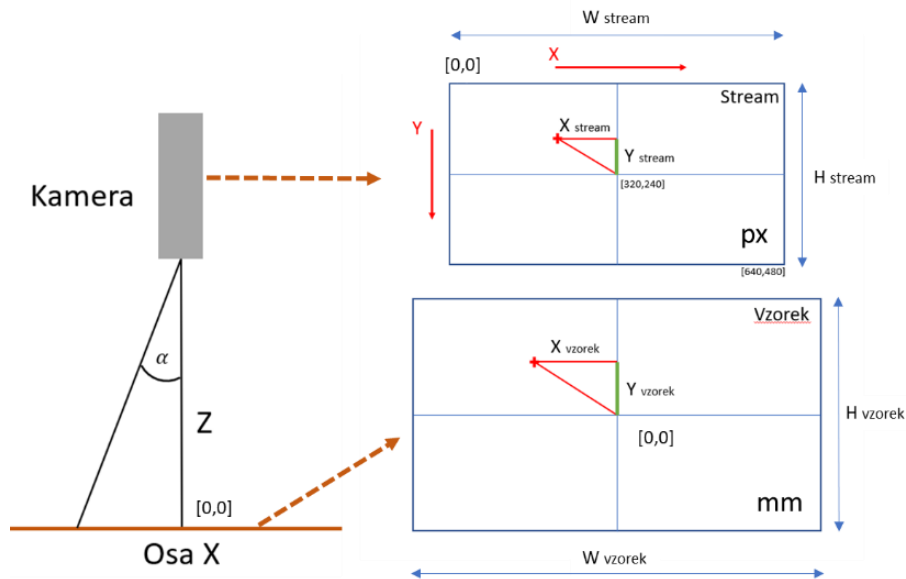
Implementace programu probíhala dle návrhu softwarové architektury, implementace grafického uživatelského rozhraní, dle návrhu čárových modelů, kdy byla použita knihovna Swing. Při tvorbě programu bylo nutno vyřešit několik problémů. Jak jsme postupovali při řešení těchto programově náročnějších částí je popsáno níže.

3.7.1 Asynchronní operace

Aby nedocházelo k zamrznutí ovládacího programu bylo nutné část operací provádět asynchronně vzhledem k hlavnímu vláknu běžícího programu. Thready byly implementovány pro všechny delší operace, jako bylo nahrávání videa a ovládání motorů. Všechny thready jsou vytvářeny ve třídě Controller, odkud se pak následně volají metody ve třídách Printer a Cameras.

3.7.2 Výpočet reálné polohy měřeného bodu

Při tvorbě obslužného programu jsme narazili na nutnost zajistit přepočtení polohy bodu v okně kamery snímající seshora na reálnou polohu bodu nacházejícím se na zkoumaném vzorku. Vzhledem k tomu, že tento přepočtení je třeba dělat pro různé výšky kamery nad povrchem, musíme znát kromě velikost okna streamu také úhel snímání, jak je znázorněno na **obrázku 14**.



Obrázek 14: Geometrie – výpočet reálné polohy měřeného bodu po jeho označení v okně streamu kamery

Fyzickou polohu na vzorku pro osu X_{vzorek} se středem souřadnic uprostřed zorného pole kamery vypočítáme dle vzorce:

$$X_{vzorek} = \left(X_{stream} - \frac{W_{stream}}{2} \right) \frac{W_{vzorek}}{W_{stream}} = \left(X_{stream} - \frac{W_{stream}}{2} \right) \frac{2 z_{vzorek} \operatorname{tg} \alpha}{W_{stream}} \quad (6)$$

Abychom mohli přepočítání provést musíme znát jednotlivé konstanty a musíme být schopni určovat jednotlivé proměnné obsažené ve vzorci:

Velikost úhlu (α): Důležitým krokem bylo zjistit úhel pod kterým kamera snímá povrch pod sebou. Provedli jsme několik měření, jejichž výsledkem bylo zjištění, že v ose X je úhel snímání 13 stupňů. Pro lepší představu je celá situace zachycena na **obrázku 14**. Získali jsme tak konstantu $\alpha = 13^\circ$.

Velikosti okna streamu (W_{stream}): Tento údaj vychází z velikosti okna, do kterého je přenášen stream z kamery, umístěné nad povrchem.

Výška kamery (z_{vzorek}): Tento údaj se mění v závislosti nastavení kamery uživatelem. Vždy jsme však schopni tuto hodnotu získat z dat, které si program ukládá při jakémkoli posunu 3D tiskárny ve směru osy Z, musíme však odečíst výšku vzorku.

Poloha v okně streamu (X_{stream}): Tuto hodnotu získáváme tak, že jsme si nad oknem streamu vytvořili virtuální síť o velikosti oka 1 pixel a díky této síti dokážeme přesně určovat pozici označeného bodu v okně. Důležité je poznamenat, že bod se souřadnicemi 0,0 se nachází

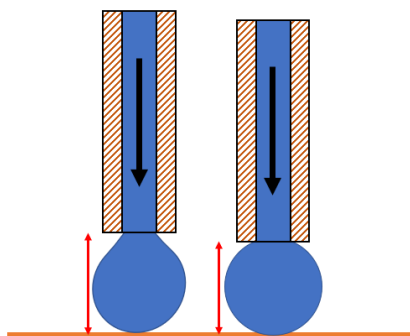
v horním levém rohu okna streamu, osa posuvu X je v horizontálním směru a osa posuvu Y ve vertikálním směru.

Při znalosti všech těchto údajů jsme byli schopni přesně určit posun v horizontálním směru X_{stream} a tuto hodnotu pak připočíst k pozici, kterou měla při zadávání bodů kamera. K získání posunu v ose Y jsme využili znalost, že máme čtvercové pixely tj. faktu že následující poměry jsou stejné: $H_{vzorek}:H_{stream} = W_{vzorek}:W_{stream}$. Výsledný vzorec pro posun v ose Y_{vzorek} pak vypadá následovně:

$$Y_{vzorek} = \left(Y_{stream} - \frac{H_{stream}}{2} \right) \frac{W_{vzorek}}{W_{stream}} \quad (7)$$

3.7.3 Výpočet minimální výšky jehly nad povrchem

Algoritmus pro určení minimální výšky, ze které je nutné kapat tak, aby se kapka oddělila a ulpěla na testovaném materiálu byl vytvořen na základě znalosti objemu kapaliny, která se bude na materiál nanášet. Malá kapka, která vzniká na špičce jehly zaujímá před oddělením od jehly přibližný tvar koule. Samozřejmě, je nutné počítat s vlivem gravitační síly, která tvar kapky deformuje. Jak je však vidět na **obrázku 15**, deformace způsobená působením gravitační síly, vždy velikost kapky ve svislém směru zvětší. Proto je pro náš případ přípustné zanedbat tuto deformaci a vycházet z předpokladu, že kapka má před oddělením tvar koule.



Obrázek 15: Schéma kapky na jehle s vlivem gravitační síly (vlevo) a bez (vpravo)

Pro určení objemu koule známe přesný matematický vzorec, ze kterého již není problém zpětně dopočítat průměr koule. A právě tento údaj je pro nás důležitým parametrem, neboť minimální výška je rovna průměru vznikající kapky. Zapišeme-li tuto úvahu matematicky získáme následující vzorec.

$$V = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d^3 \rightarrow d = \sqrt[3]{\left(\frac{6 \cdot V}{\pi}\right)} \quad (8)$$

Aplikací takto upraveného vzorce jsme získali hodnotu, pomocí které jsme dokázali vykreslit čáru do streamu z boční kamery, která uživatele informovala o minimální výšce ze které se má kapat tak, aby se kapka bezproblémově oddělila od jehly stříkačky a ulpěla na testovaném materiálu.

Výsledný spustitelný program je na přiloženém CD v adresáři: „Program“. Zdrojové kódy programu jsou uloženy v adresáři: „Program_kód“.

3.8 Aplikace goniometru

3.8.1 Určení povrchové energie

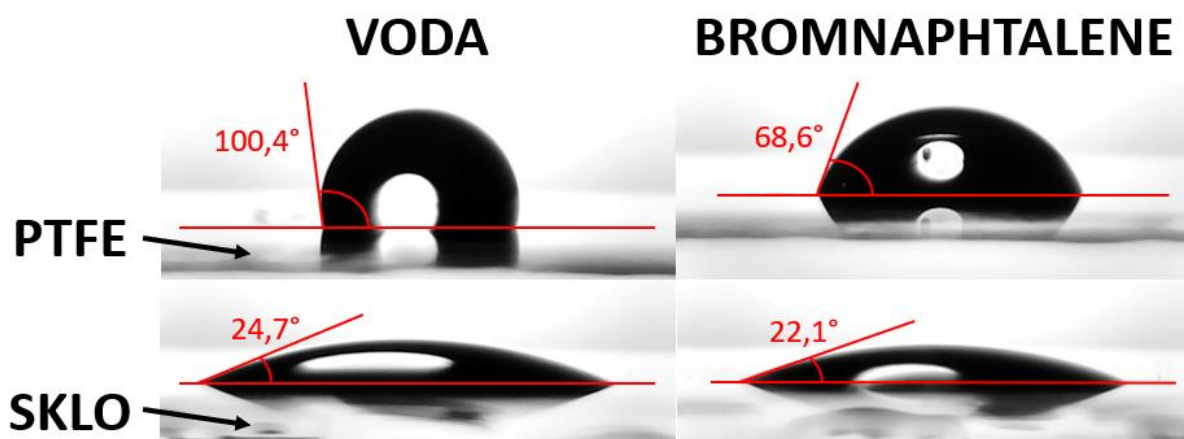
Na **obrázku 12** je vidět **obrazovka 1** hotového řídicího softwaru. Jak bylo zmíněno v **kapitole 2.6** jsou zde umístěny základní nastavení pro běh programu, mezi které patří připojení k 3D posuvu (nabídka zcela nahoře), výběr adresáře do kterého budou ukládány pořízené záznamy a nakonec výběry použitých kapalin.

Zůstaňme ještě u stříkaček s kapalinou. Uživatel, musí před začátkem měření naplnit minimálně jednu stříkačku kapalinou, tak aby byla při měření použitelná. Má k tomu dvě možnosti. Zaprvé, může stříkačku vyjmout z posuvu, ručně ji naplnit mimo měřicí přístroj a poté ji do posuvu opět vrátit. Toto řešení je velice jednoduché, ale může být pro některé uživatele méně komfortní. Lze proto použít i druhou variantu. Uživatel se přepne do manuální kontroly goniometru (viz. **obrázek 12, obrazovka M1**). Na stůl goniometru umístí vhodnou nádobku s kapalinou a pomocí kontroly posuvu najede se stříkačkou nad nádobku a po ponoření jehly lze kontrolou posuvu kapalinu strojem do stříkačky nasát. Tento postup je bezpečnější pro stříkačku, která je umístěna v posuvu, neboť se zde vyhneme nebezpečí poškození stříkačky při vyjmutí a opětovném vložení do přístroje. Tento postup lze použít pro obě osazené stříkačky. Samozřejmě lze tento postup použít i v opačném případě, tedy pokud potřebujeme ze stříkačky odstranit kapalinu, kterou jsme při měření nevypotřebovali. Před samotným automatickým měřením je vhodné si několikrát cvičně odkápnout kapku (v manuálním režimu) pro otestování bezproblémové činnosti goniometru. Jak takové odkápnutí vypadá je vidět na **obrázku 16**. Nejdříve si připravíme kapku na špičce jehly a poté pomalu přiblížíme jehlu k povrch, tak aby došlo k vzájemnému kontaktu kapky a povrchu. Při tomto dotyku dojde k odkápnutí kapaliny a přisednutí kapky na povrch testovaného materiálu.



Obrázek 16: Odkápnutí kapky na měřený povrch

Po otestování goniometru je možno provést automatické měření na požadovaných materiálech. Měření provádíme tak, že na testované materiály nanášíme kapky minimálně dvou kapalin, záznamy vzniklých kapek jsou pak automaticky vytvořeny. Příklad výsledků takovýchto měření je možno vidět na **obrázku 17**. Jedná se o dva materiály, konkrétně sklo a sklo pokryté tenkou (100 nm) vrstvou plazmově polymerizovaného PTFE, na něž bylo postupně kapáno nejdříve vodou a posléze bromnaphthalenem.

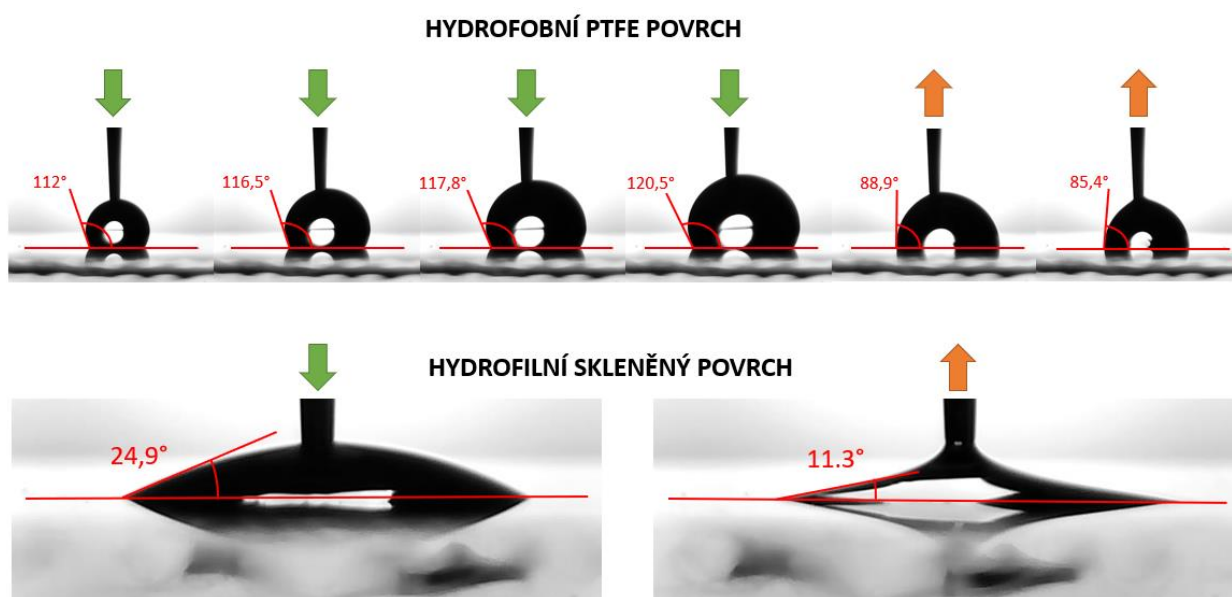


Obrázek 17: Fotografie kapek různých kapalin na různé povrchy

Po použití Fowkesovy teorie (viz. **rovnice 4**) dostáváme povrchovou energii PTFE 26.6 mN.m^{-1} (0.9 polární a 20.7 disperzní část) a skla 70.0 mN.m^{-1} (28.7 polární a 41.2 disperzní část). Vidíme, že aplikace vrstvy dva až tři řády tenčí než tloušťka lidského vlasu radikálně změnila vlastnosti materiálu.

3.8.2 Určení postupujícího a ustupujícího kontaktního úhlu

Další možností měření na goniometru je měření postupujícího a ustupujícího kontaktního úhlu. Toto měření spočívá v přiblížení jehly stříkačky k povrchu testovaného materiálu a následném postupném vytlačování kapaliny, přičemž se při každém postupném kroku pořizuje fotografie. Takto získáme data pro postupující uhel. Opačným postupem, tedy postupným nasáváním vytlačené kapaliny zpět do stříkačky získáváme data pro uhel ustupující. Analýzou získaných fotografií, tedy určením kontaktního úhlu, získáváme důležité informace o dynamických vlastnostech povrchu, na kterém jsme měření prováděli. Příklad takového měření je vidět na **obrázku 18**. Pro lepší pochopení je pomocí šipek naznačeno kdy je kapalina ze stříkačky vytlačována a kdy je naopak nasávána. Do obrázku jsou také zakresleny výsledné úhly, kdy postupující úhly jsou větší, než úhly ustupující – takové chování nazýváme hystereze kontaktního úhlu. Čím je tato hystereze menší, tím dříve bude kapka při schnutí měnit svůj kontaktní poloměr.

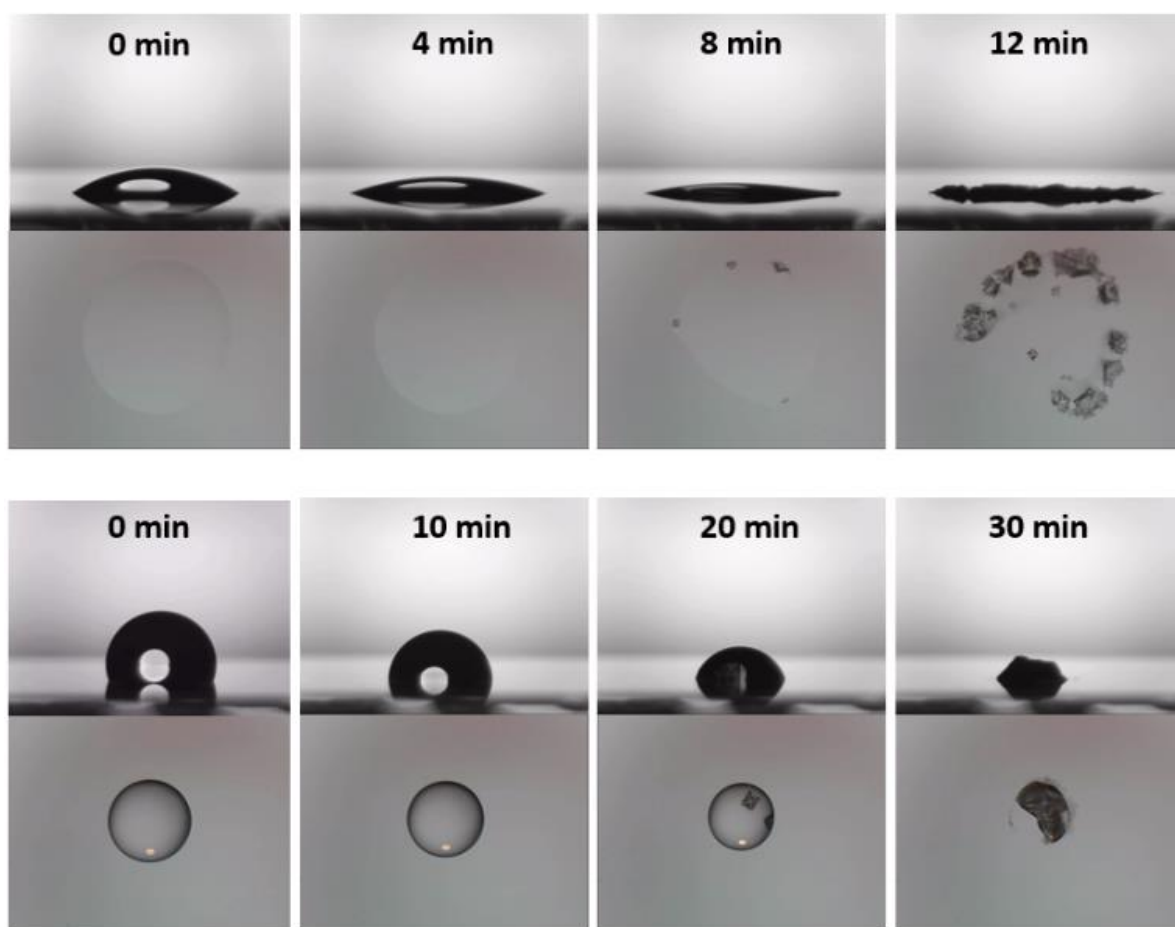


Obrázek 18: Postupující a ustupující kontaktní úhel na hydrofobním PTFE a hydrofilním skleněném povrchu

3.8.3 Schnutí kapky

Při měření schnutí kapky kapaliny na povrchu testovaného materiálu je potřeba použít obě kamery, kterými je goniometr vybaven. Poté co je na testovaný materiál kápnuta kapka zapne se nahrávání na obou kamerách a pořizuje se video záznam až do okamžiku úplného zaschnutí kapky. Příklad tohoto měření, kdy byl na hydrofilní a hydrofóbní povrch kápnuto

5 μl roztoku se solí o koncentraci 100 g/l, je na **obrázku 19**. Jedná se o nastříhané snímky z pořízených videozáznamů v pravidelných časových odstupech. V průběhu schnutí obvykle rozlišujeme různé fáze schnutí, kdy rozlišujeme zda-li je konstantní kontaktní úhel, či kontaktní poloměr. Z pořízených záznamů je vidět, že kapka na hydrofilním skleněném povrchu svůj kontaktní poloměr nemění, což vede k depozitu soli na velké ploše do tzv. coffee ringu, opačná situace je u hydrofóbního kluzkého PTFE povrchu, kdy dojde k depozici do bodu, kdy došlo k většímu zkoncentrování soli. Takové zkoncentrování analytu bychom mohli použít například pro zvýšení signálu některých biodetekčních metod. Všimněme si také, že kapka na hydrofilním povrchu schne rychleji, což je dáno jejím větším povrchem oproti kapce na povrchu hydrofóbním. Porozumění těmto jevům provázející zasychající kapku najde mimo základní výzkum přímé aplikace například v již zmíněné biodetekci, v tisku, či při výrobě organické elektroniky.



Obrázek 19: Schnutí kapky

4. Závěr

Aby bylo možné vyvíjet funkční povlaky, které budou vykazovat přesně definované povrchové vlastnosti je nezbytně důležité, abychom dokázali s co největší přesností určovat povrchovou energii a smáčivost těchto povrchů. Tento požadavek sebou přináší potřebu provádět velké množství měření, které nám poskytnou výše zmíněné údaje.

Naším cílem, který jsme realizovali bylo navrhnout a sestavit automatizované měřící zařízení, které by plnilo všechny námi předem definované funkční požadavky založené na metodách měření interakce povrchu s kapalinou, metoda sedící kapky, určení povrchové energie, měření evoluce povrchových vlastností s časem, či schnutí kapky. Z jednotlivých kroků stavby zařízení, které jsme provedli je vhodné připomenout vývoj vlastních motorizovaných dávkovačů kapaliny a jeho uchycení spolu s horní kamerou k pojezdu 3D tiskárny. Dále návrh a implementaci řídicího programu, který umožňuje uživateli plně kontrolovat celé zařízení a využít tak plně jeho možnosti. Důležitým prvkem při práci pro nás byla přenositelnost na jiné systémy, proto byl řídicí program napsán v jazyce Java. Zároveň jsme dbali i na co největší přenositelnost na jiný hardware, kdy byl použit 3D posuv a řídicí jednotka z 3D tiskárny, která byla řízena standardním programovacím jazykem G-code. Celé zařízení jsme následně otestovali při měření vlastností skla a skla pokrytého vrstvou plazmově polymerizovaného PTFE s tloušťkou 100 nm.

Přístroj je připraven na další případné vylepšení a to především v oblasti řídicího softwaru, jenž implementuje rozhraní mezi jednotlivými částmi programu. Konkrétně lze rozšiřovat automatizaci některých měřících metod. Nakonec je dobré zmínit, že při naší práci na stavbě měřícího přístroje byly namodelovány, vytištěny a sestaveny posuvy pro stříkačky, které samy o sobě jsou funkčními celky samostatně použitelnými i v jiných aplikacích.

Seznam použitých zdrojů:

- [1] K. L. Mittal, Contact Angle, Wettability and Adhesion, Volume 6, CRC Press, Leiden Boston, 2005
- [2] V. Buršíková, Surface energy evaluation of plasma treated materials by contact angle measurement. Masaryk University, Brno, 2004
- [3] A. Bandyopadhyay a S. Bose, Characterization of biomaterials. Elsevier, Amsterdam, 2013
- [4] Z. Guo, L. Tan, Fundamentals and applications of nanomaterials Boston: Artech House, Boston, London, 2009
- [5] R. N. Wenzel, Resistance of solid surfaces to wetting by water, Ind. Eng. Chem., 28 (1936) 988–994
- [6] A. Cassie and S. Baxter, Wettability of porous surfaces, Trans. Faraday Soc., 40 (1944) 546–551
- [7] *Accu Dyne Test: Surface Tension Components and Molecular Weight of Selected Liquids*, https://www.accudynetest.com/surface_tension_table.html#005
- [8] Ch. Dorrer, J. Rühle, Advancing and Receding Motion of Droplets on Ultrahydrophobic Post Surfaces, Langmuir, 22 (2006) 7652–7657
- [9] T. Still, P. J. Yunker, A. G. Yodh, Surfactant-Induced Marangoni Eddies Alter the Coffee-Rings of Evaporating Colloidal Drops, Langmuir, 28 (2012) 4984–4988
- [10] J. Skalický, Elektrické servopohony. Vyd. 2. Vysoké učení technické, Brno, 2001
- [11] L. Maixner, N. Kloski, Mechatronika: učebnice. Vyd. 2. Computer Press, Brno, 2006
- [12] L. W. Kloski, N. Kloski, Začínáme s 3D tiskem. Vyd. 2. Computer Press, Brno, 2017
- [13] P. Talverdi, Cnc Lathe G-Code & M-Code Illustrative Handbook, Lulu.com, 2010
- [14] Tinkercad | From mind to design in minutes, Copyright © 2019 Autodesk, <https://www.tinkercad.com>
- [15] Netfabb: Netfabb Online Service - check and repair your STLs, <https://service.netfabb.com>

- [16] FREE Serial Protocol Analyzer and Com Port Packet Data Sniffer, Copyright © 2019 HHD Software Ltd. <https://freeserialanalyzer.com>
- [17] Apache NetBeans (incubating), <https://netbeans.apache.org>
- [18] All3DP | World's #1 3D Printing Magazine, <https://all3dp.com/1/geeetech-a10m-review-3d-printer-specs>
- [19] Printron: Pure Python 3d printing host software, <http://www.pronterface.com>
- [20] Webcam Capture in Java, <http://webcam-capture.sarxos.pl>
- [21] JxCapture — Image and Video capturing in Java applications, Copyright © 2019 TeamDev Ltd. All rights reserved, <https://www.teamdev.com/jxcapture>

Seznam obrázků:

Obrázek 1: Schéma přisedlé kapky, Youngův, Wenzelův a Cassie-Baxterův model	9
Obrázek 2: Postupující a ustupující kontaktní úhel	12
Obrázek 3: Schnutí kapky do bodu, do “coffee ringu”	13
Obrázek 4: Dvoufázové napájení krokového motoru	14
Obrázek 5: Příklad příkazu v G kódu	15
Obrázek 6: Geetech A10M, díly pro vývoj dávkovače kapaliny	19
Obrázek 7: Modely pro tisk – návrh tisknutých dílů a návrh jejich uspořádání	20
Obrázek 8: Vytisknuté 3D modely a zkompletovaný finální posuv	21
Obrázek 9: Model základní desky a vytisknutá základní deska	23
Obrázek 10: Konstrukce uchycení kamery a plošný světelný zdroj	24
Obrázek 11: Fotografie finálního goniometru + popis	25
Obrázek 12: Drátěný model programu s použitím snímků obrazovky	28
Obrázek 13: Architektura programu – propojení tříd	32
Obrázek 14: Výpočet reálné polohy měřeného bodu	34
Obrázek 15: Schéma kapky na jehle s vlivem gravitační síly a bez	35
Obrázek 16: Odkápnutí kapky na měřený povrch	37
Obrázek 17: Fotografie kapek různých kapalin na různé povrchy	37
Obrázek 18: Postupující a ustupující kontaktní úhel na hydrofob. a hydrofil. povrchu	38
Obrázek 19: Schnutí kapky	39

Seznam tabulek:

Tabulka 1: Různé kapaliny, jejich polární a nepolární složky [7]	10
Tabulka 2: Příklady příkazů v G kódu [13]	26