



Bakalářská práce

Příprava dílů pro PIV měření

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Autor práce:

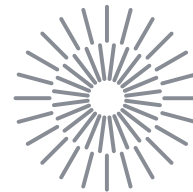
Eliška Vaňková

Vedoucí práce:

Ing. Jan Novosád, Ph.D.

Katedra energetických zařízení

Liberec 2023



Zadání bakalářské práce

Příprava dílů pro PIV měření

<i>Jméno a příjmení:</i>	Eliška Vaňková
<i>Osobní číslo:</i>	S19000197
<i>Studijní program:</i>	B0715A270008 Strojírenství
<i>Zadávací katedra:</i>	Katedra energetických zařízení
<i>Akademický rok:</i>	2022/2023

Zásady pro vypracování:

Katedra energetických zařízení TUL disponuje PIV systémem vhodným pro měření 2D a 3D rychlostních polí v tekutinách. Systém je založen na optických (bezkontaktních) metodách měření. Pro měření pomocí PIV systému je nezbytné vytvořit v měřeném úseku části potrubních kanálů s opticky vhodnými vlastnostmi. U tvarově složitých kanálů není možné vždy zajistit vhodný polotovar z důvodu omezené nabídky rozměrů u komerčně dostupných polotovarů. Obráběné díly nejsou zpravidla vhodné z důvodu nevyhovující struktury povrchu, která způsobuje nežádoucí změny optických vlastností při průchodu laserového svazku, zejména rozptyl a odrazy, které znehodnocují snímky při měření.

Cílem této práce je určení a porovnání optických vlastností materiálů s cílem nalezení vhodné konfigurace pro výrobu potrubních dílů pro PIV měření. Předpokládá se využití technologie odlévání z epoxidové pryskyřice a 3D SLA tisku s použitím aditiva, které má zajistit změnu vlnové délky laserového svazku při průchodu stěnou potrubí a tím snížit míru odraženého a rozptýleného světla.

Cíle práce jsou:

1. Rešerše metod použitelných pro eliminaci nežádoucích optických jevů při průchodu světla přes rozhraní materiálů s opticky odlišnými vlastnostmi.
2. Návrh a příprava zkušebních vzorků s různou koncentrací aditiva.
3. Příprava experimentu a stanovení optických vlastností vzorků.
4. Aplikace výsledků na výrobu tvarového dílu a zhodnocení použitelnosti pro PIV měření.

<i>Rozsah grafických prací:</i>	5
<i>Rozsah pracovní zprávy:</i>	30
<i>Forma zpracování práce:</i>	tištěná/elektronická
<i>Jazyk práce:</i>	Čeština

Seznam odborné literatury:

Doporučená literatura:

1. Kopecký, V.: Laserové anemometrie. 2005. TU v Liberci.
2. Hábovčík, P.: Lasery a fotodetektory. 1989. Alfa Bratislava.
3. Raffel, M., Willert, C. E., Scarano, F., Kahler, C. J., Wereley, S. T., & Kompenhans, J. Particle image velocimetry: a practical guide. Springer 2007.
4. Adatrao, Sagar & Sciacchitano, Andrea. (2019). Elimination of unsteady background reflections in PIV images by anisotropic diffusion. Measurement Science and Technology. 30. <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6501/aafca9>
5. Bisel, Tucker & Dahlberg, Jerry & Martin, Tony & Owen, Spencer & Keanini, Russell & Tkacik, Peter & Narayan, Nithin & Goudarzi, Navid. (2017). A Comparison of Flat White Aerosol and Rhodamine (R6G) Fluorescent Paints and Their Effect on the Results of Tomographic PIV Measurements. <http://dx.doi.org/10.1115/IMECE2017-71507>
6. Willert, Christian & Gharib, Morteza. (1991). Digital Particle Image Velocimetry. Experiments in Fluids. 10. 181-193. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00190388>
7. Paterna, Enrico & Moonen, P & Dorer, Viktor & Carmeliet, Jan. (2013). Mitigation of surface reflection in PIV measurements. Measurement Science and Technology. 24. 057003. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/24/5/057003>
8. Xue, Zhenyu & Charonko, John & Vlachos, Pavlos. (2014). Particle image velocimetry correlation signal-to-noise ratio metrics and measurement uncertainty quantification. Measurement Science and Technology. 25. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/25/11/115301>

Vedoucí práce: Ing. Jan Novosád, Ph.D.
Katedra energetických zařízení

Datum zadání práce: 1. listopadu 2022

Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2024

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Petra Dančová, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 31. října 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědoma toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědoma následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Poděkování

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu Ing. Janu Novosádovi, Ph.D. a Ing. Jaroslavu Pulcovi za pomoc s touto prací, cenné rady a vstřícnost poskytnutou během konzultací.

Také bych chtěla poděkovat své rodině a přátelům za podporu.

Anotace

Bakalářská práce je zaměřena na přípravu fluorescenčních dílů pro PIV měření za účelem snížit množství rozptýleného světla a odrazů. První část obsahuje popis metody PIV, druhá popis optických jevů na rozhraní. V třetí části je provedena rešerše metod pro snížení množství rozptýleného a odraženého světla při PIV měření.

Tyto poznatky jsou aplikovány při návrhu fluorescenčních dílů. Pro výrobu vzorků byly zvoleny dvě metody: odlévání z epoxidové pryskyřice a 3D SLA tisk. Jako aditivum byl použit Rhodamin 6G. U vzorků byla měřena energie laserového paprsku prošlého skrz a intenzita odraženého světla. V praktické části je rovněž popsáno uspořádání experimentu a jsou tam blíže popsána použita zařízení. Závěrem je vyhodnocení naměřených dat.

Klíčová slova

PIV, fluorescence, fluorescenční model, rhodamin 6G, optické měření

Annotation

The bachelor's thesis is focused on preparation of fluorescent parts for PIV measurement in order to reduce light scattering and reflection. In the first part there is a description of basic principles of PIV. The second part contains a description of the optical phenomena at the interface. The third part consists of an overview of methods for reducing the amount of scattered and reflected light in PIV measurements.

These findings are applied to the design fluorescent parts. There are two methods chosen for manufacture of the samples: epoxy resin casting and 3D SLA printing. As an additive was used Rhodamine 6G. For the samples, the energy of the laser beam passed through, and the intensity of the reflected light were measured. In the practical section there are also described the experimental setup and details of the used equipment. At the end the work contains of an evaluation of the measured data.

Key words

PIV, fluorescence, fluorescent parts, rhodamine 6G, optical measurement,

Obsah

Seznam zkratk a symbolů	9
Úvod	10
1. PIV	11
1.1. Princip PIV	11
1.2. Využití a nedostatky	13
2. Optické jevy na rozhraní.....	14
3. Odraz světla a PIV.....	15
3.1. Brewsterův úhel vzduch-voda	15
3.2. Zpětný lom	15
3.3. Zpracování obrazu	16
3.4. Materiál modelu.....	17
3.5. Matná černá barva	17
3.6. Fluorescenční barviva.....	17
3.6.1 Fluorescenční stopovací částice	19
3.6.2 Fluorescenční barva	19
3.6.3 Fluorescenční model	20
4. Metodika	21
4.1. Fluorescenční vzorky	21
4.1.1 Odlévání z pryskyřice.....	22
4.1.2 3D SLA tisk.....	22
4.2. Použitá zařízení	23
4.2.1 Senzor	23
4.2.2 Kamera	24
4.2.3 Laser	24
4.2.4 Filtr zeleného světla	24
4.2.5 Přípravek na upevnění vzorku.....	24
4.3. Uspořádání experimentu	26
4.4. Zapojení měřící aparatury	27
5. Realizace experimentu	28
5.1. Zaostření kamery.....	28
5.2. Testování povlaku senzoru.....	28
5.3. Parametry měření	29
5.4. Vzorky.....	29
6. Vyhodnocení experimentu.....	30
6.1. Tištěné vzorky.....	30

6.2. Odlévané vzorky	31
Závěr	37
Seznam Literatury	38

Seznam vybraných zkratek a symbolů

zkratka	celý názvem
PIV	Particle Image Velocimetry
SLA	Stereolitografie
CCD	Charge-coupled device
PMMA	Polymethylmethakrylát

symbol	jednotka	význam
$t, \Delta t$	s	čas, časový přírůstek
v	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	rychlost
$s, \Delta s$	m	dráha, vzdálenost uražená částicemi
α	°	úhel dopadu
α'	°	úhel odrazu
β	°	úhel lomu
t_i	mm	tloušťka vzorku

Úvod

Metoda PIV (Particle Image Velocimetry) umožňuje optické zkoumání proudění pomocí laseru. Důležitou oblastí výzkumu proudění je oblast mezní vrstvy a interakce proudění v blízkosti tělesa/pevné stěny. PIV měření v této oblasti je často ovlivněno nežádoucími odrazy světla, k nimž dochází při dopadu laseru na pevný povrch.

Tato bakalářská práce je zaměřena na přípravu fluorescenčních dílů pro PIV měření, metodou odlévání z epoxidové pryskyřice a 3D SLA tisku s použitím aditiva, které má zajistit změnu vlnové délky laserového svazku. Práce se zabývá porovnáním optických vlastností vzorků, tj. intenzita odraženého světla a energie laserového paprsku prošlá vzorkem. Cílem je práce snížit množství rozptýleného světla, odrazů a nalezení konfigurace, která by byla vhodná pro výrobu tvarových dílů.

Teoretická část

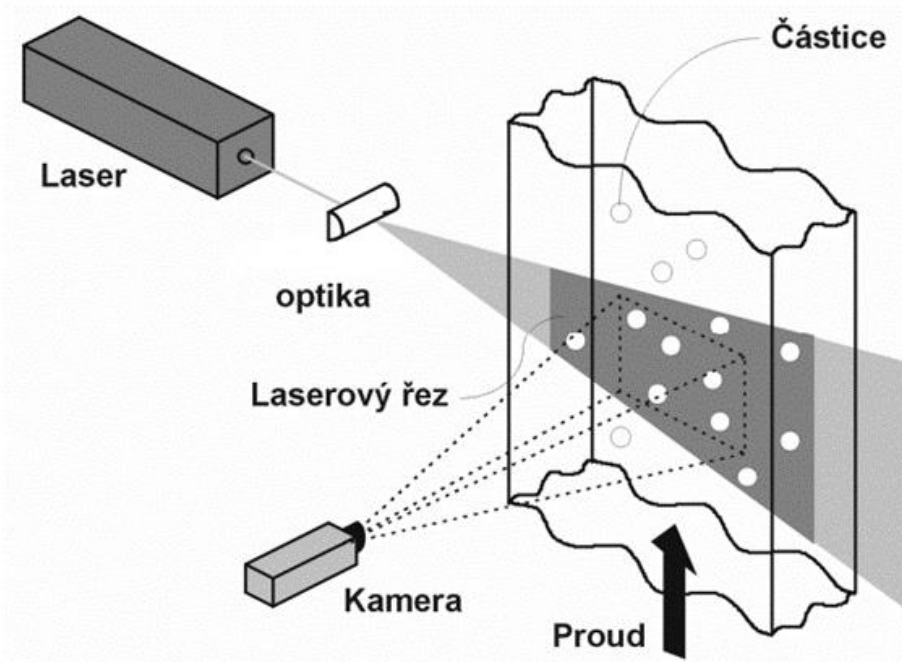
1 PIV

Jak bylo zmíněno v úvodu, metoda PIV (Particle Image Velocimetry) umožňuje optické zkoumání proudění pomocí laseru. Její hlavní předností v porovnání s ostatními technikami, které se v této oblasti výzkumu tradičně uplatňují (anemometr se žhaveným drátem a Pitotova trubice), je, že se k měření nevyužívají sondy, takže při měření pomocí PIV je proudění ovlivněno/deformováno mnohem méně, což umožňuje větší možnosti při měření. [1]

1.1 Princip PIV

Princip měření rychlosti proudícího média metodou PIV je založen na zaznamenání pozic stopovacích/trasovacích částic unášených proudem.

Ve sledované oblasti proudového pole jsou částice osvětleny dvěma krátkými laserovými pulzy s jasně definovaným časovým posunem. Laserový svazek je speciální optikou vytvarován do světelné roviny (pro 2D a stereoskopické PIV) nebo do světelného objemu (tomografické PIV). Polohy částic jsou zaznamenány na médium citlivé na světlo, jako je fotografický film nebo CCD detektor kamery. Na pořízeném záznamu kamery se částice jeví jako světlé skvrny na tmavém pozadí [2]. Znázorněno na Obr. 1.



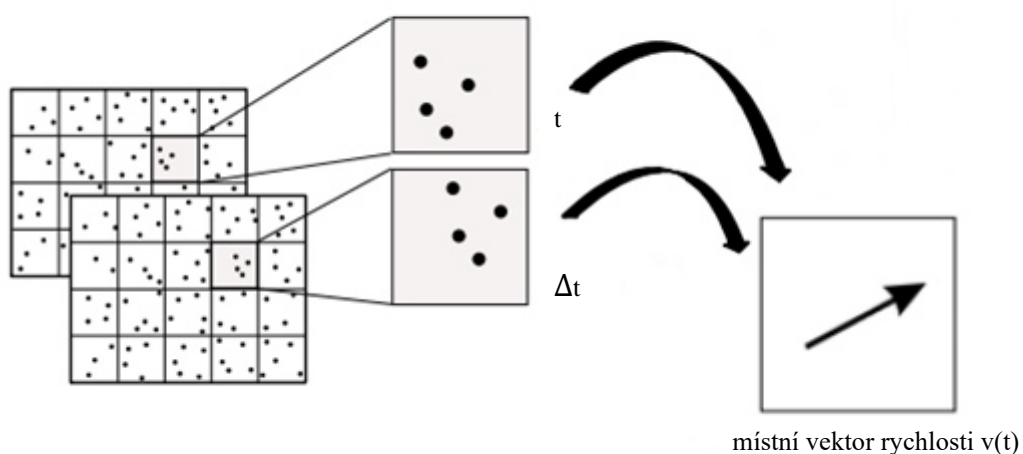
Obr. 1 Typické uspořádání PIV metody – převzato z [2].

K určení posunu, který se týká každé sledované částice nebo obvykle skupin sledovaných částic, se používá postup počítačového zpracování obrazu. Výsledné snímky se pak vyhodnocují pomocí základní rovnice

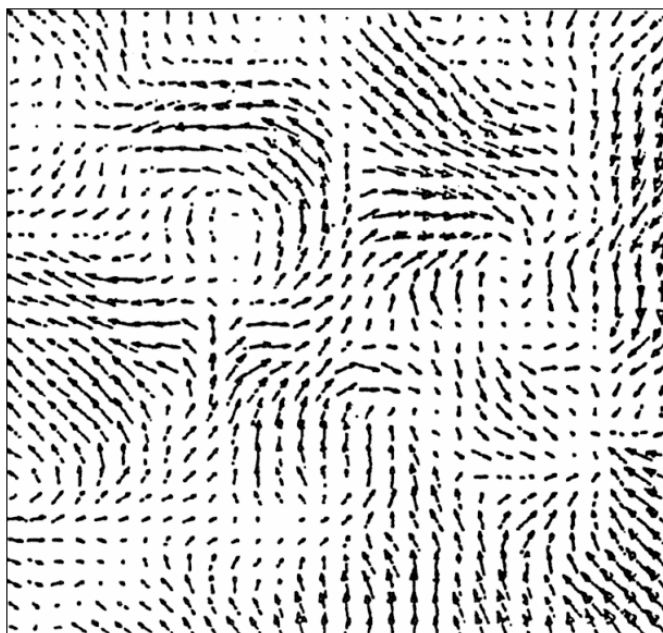
$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}, \quad (1)$$

kde v ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) je rychlost částice, Δs (m) je její posun mezi dvěma snímky a Δt (s) je časový posun mezi snímky [1].

Uvedeným postupem se stanoví vektor rychlosti pro každou vyhodnocovanou oblast, viz Obr. 2. Souhrnné výsledky měření se obvykle prezentují ve formě vektorové mapy, jak je znázorněno na Obr. 3 [2].



Obr. 2 Vyhodnocení záznamu pomocí vzájemné korelace převzato z [3].



Obr. 3 Vektorová mapa pořízená metodou PIV [2].

1.2 Využití a limity PIV

Důležitou oblastí výzkumu proudění je oblast mezní vrstvy a interakce proudění v blízkosti tělesa/pevné stěny. Vzhledem k tomu, že jakýkoliv zásah do této oblasti mění charakteristiky proudění, je pro studium jevů v blízkosti stěny nutné využití neinvazivních metod, jakou poskytuje systém PIV [4]. Měření nejbližší stěně, které bylo pomocí 2D PIV provedeno, bylo v oblasti 0,5 mm od rovinných ploch (s laserovým řezem o tloušťce 1 mm) [5].

Snímky pořízené metodou PIV jsou často ovlivněny nežádoucími odrazy světla, k nimž dochází při dopadu laseru na pevný povrch. Intenzita těchto odrazů může být o jeden řád větší než intenzita obrazů částic, což znemožňuje přesné určení rychlosti proudění [6].

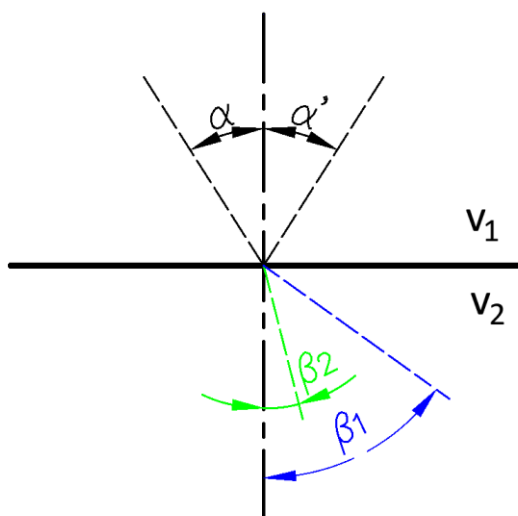
Nechtěné odrazy světla mohou mít za následek kromě přeexponování v oblastech blízko povrchu a zkreslení výsledků, také poškození sensorů kamery [2].

2 Optické jevy na rozhraní

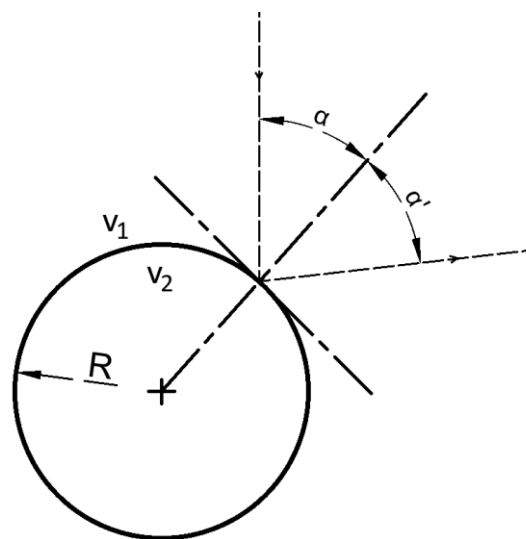
Na rozhraní dvou prostředí se světlo částečně odráží a částečně láme, to je znázorněno na Obr. 4 a Obr. 5. Závislost mezi chováním dopadajícího paprsku a paprsku odraženého je popsána zákonem odrazu: Úhel dopadu α je stejný jako úhel odrazu α' , odražený paprsek zůstává v rovině dopadu.

Lom světla je závislý na poměru optických hustot prostředí na obou stranách rozhraní. V opticky hustším prostředí se světlo pohybuje s vyšší rychlostí v než v opticky řidším prostředí. Podle toho, do jakého prostředí paprsek přechází, určujeme lom světla ke kolmici, na Obr. 4 znázorněno zeleně ($v_1 > v_2$), a lom světla od kolmice ($v_1 < v_2$) - modře. Lom světla ke kolmici nastává při přechodu světla z prostředí opticky řidšího do prostředí opticky hustšího, například na rozhraní vzduch-sklo, vzduch-voda, a naopak lom světla od kolmice nastává při přechodu světla z prostředí opticky hustšího do prostředí opticky řidšího. Obr. 5 znázorňuje případ zakřiveného povrchu.

Pro popis chování světla na rozhraní dvou prostředí zanedbáváme vlnovou délku vůči rozhraní, nedochází k ohybu a světelné paprsky se vzájemně neovlivňují.



Obr. 4 Optické jevy na rozhraní.



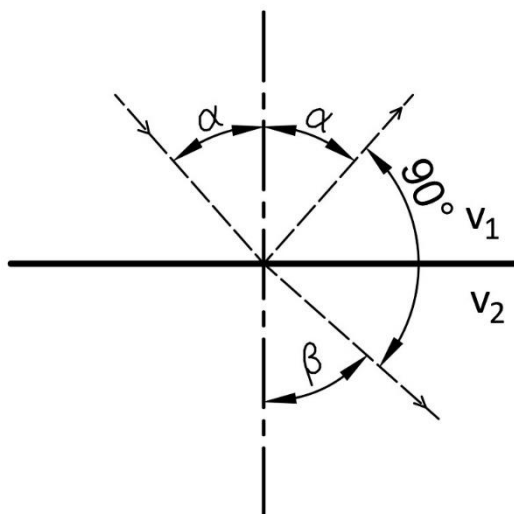
Obr. 5 Odraz světla na zakřiveném povrchu.

3 Odraz světla a PIV

Kvalita snímků pořízených během experimentu je rozhodující pro zajištění přesných výsledků, proto se snažíme vyhnout co největšímu množství rozptýleného světla a odrazů. Je známých několik přístupů, jak se při měření vyhnout nechtěným odrazům a rozptylu laserového světla.

3.1 Brewsterův úhel vzduch-voda

Některé odrazy je možné odstranit správným nakloněním kamery. Při měření ve vodních tocích s volným povrchem má naklonění kamery do Brewsterova úhlu vzduch – voda, za následek odstranění většiny odrazů od volného vodního povrchu [6]. Brewsterův úhel popisuje případ, kdy odražený paprsek je kolmý na lomený, viz Obr. 6.

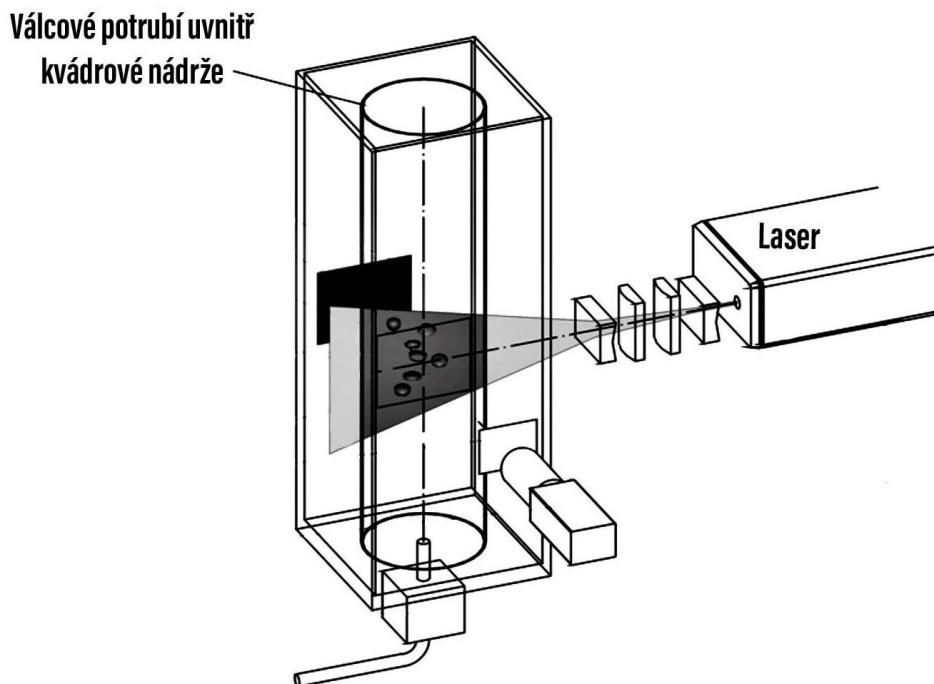


Obr. 6 Brewsterův úhel – odražený paprsek je kolmý na lomený.

3.2 Zpětný lom

Často používaným způsobem k ochraně před lomovými účinky válcových nádob je umístění válcového potrubí (viz Obr. 7), které je vyrobeno z materiálu s vysokou propustností, (např. z křemenného skla), do kvádřové nádrže s průhlednými rovinnými stěnami naplněné vodou.

Tento způsob však může být použit pouze pro 2D měření v kapalinách. Lze jím měřit pouze roviny kolmé na stěny vnější kvádřové nádrže. Tato metoda také klade velké požadavky na tvar a rozměry zkoumaného objektu [7].

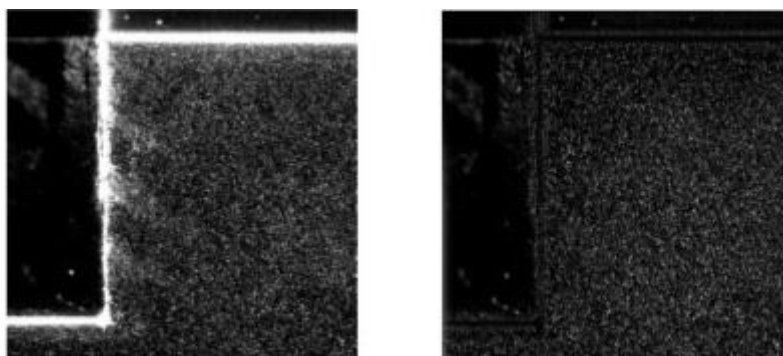


Obr. 7 Válcové potrubí uvnitř kvádřové nádrže převzato z [7].

3.3 Zpracování obrazu

Dalším způsobem, jak zpřesnit výsledky měření je následné zpracování obrazu. Cílem je odstranit ze snímků nežádoucí pozadí a zároveň zachovat signál obrazu částic. V některých případech se odstranění pozadí dosáhne jednoduše tím, že se nahraje obraz pozadí bez sledovacích částic a poté se ze záznamů PIV odstraní [6].

Způsoby zpracování obrazu při PIV měření ve své práci rozvíjí Adatrao a Sciacchitano [6], znázorněno na Obr. 8. Obecně ale platí, že tyto metody odstranění odrazu pomocí zpracování obrazu využívají složité algoritmy upravené pro dané měření a tyto metody bývají časově velmi náročné.



Obr. 8 Srovnání nezpracovaného obrazu (vlevo) a předzpracovaného obrazu (vpravo) převzato z [6].

3.4 Materiál modelu

Při stereoskopických nebo tomografických metodách PIV je výběr materiálu modelu často jediným faktorem, který lze přizpůsobit. Lze aplikovat tři možné strategie [8]:

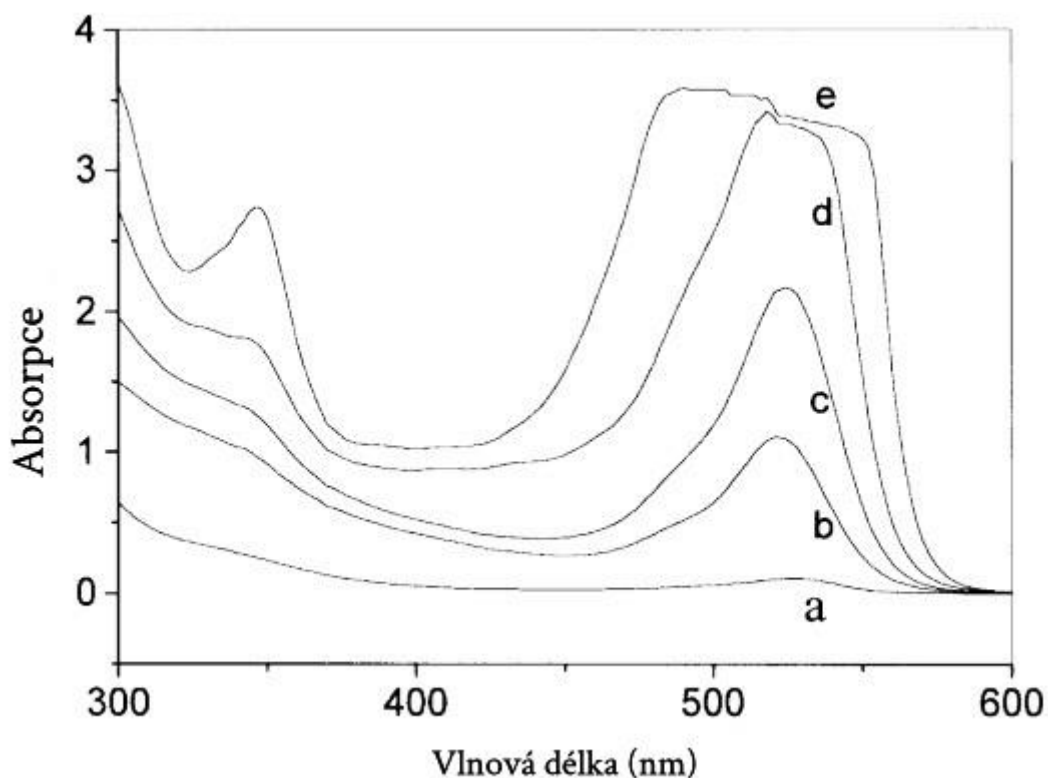
- (i) Použít materiály pohlcující energii paprsku, např. černě natřené dřevo, černě eloxované hliníkové modely nebo fluorescenční barvy.
- (ii) Maximalizovat zrcadlový odraz dopadajícího paprsku ve směru od kamery např. leštěním povrchu.
- (iii) Použít materiály s dobrou propustností povrchu, např. křemenného skla.

3.5 Matná černá barva

Často používaným způsobem je aplikace matné černé barvy. Ta snižuje povrchové odrazy, protože většina laserového paprsku dopadajícího na povrch je pohlcena. Tato metoda vyžaduje minimální přípravu. Při výzkumu proudění uvnitř objektů lze touto metodou odstranit pouze část odrazů [4].

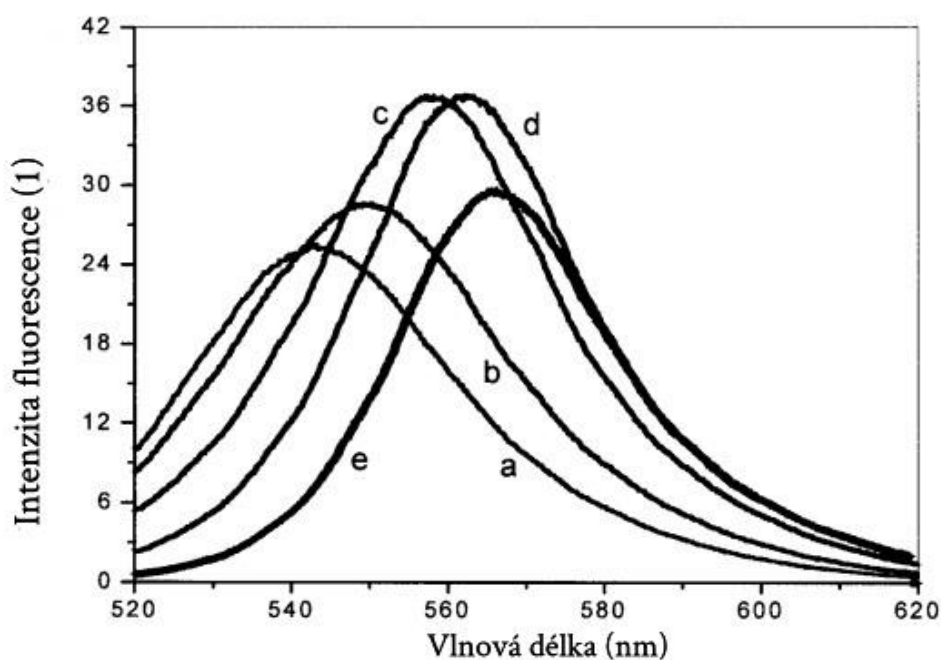
3.6 Fluorescenční barviva

Fluorescenční barviva mají absorpční spektrum, které se liší od jejich emisního spektra, viz Obr. 9. Pokud se použije laser o vlnové délce 532 nm (zelený) k osvětlení fluorescenčního barviva, světlo odražené od částic bude mít barvu o jiné vlnové délce např. žlutočervenou. Pomocí pásmového filtru je pak možné eliminovat nežádoucí odrazy a nechat projít pouze světlo odražené od barviva a vice versa [9].



Obr. 9 Absorpční spektra PMMA s příměsí Rhodaminu 6G pro různé koncentrace v mmol/l
a) 0,1 b) 0,4 c) 0,54 d) 0,7 e) 0,8 [10].

Jako fluorescenční barvivo se většinou používá Rhodamin 6G nebo Rhodamin WT. Nevýhodou rhodaminu je, že je toxický, korozivní a při vystavení laseru se rozkládá. To může vést k nepřesnostem při zkouškách přesahujících dobu rozpadu [4]. Problém při použití rhodaminu může představovat i výběr správné koncentrace. Při nízkých koncentracích se barvivo dobře rozpouští. Intenzita fluorescence se zvyšující se koncentrací barviva roste. Při vyšších koncentracích intenzita fluorescence dosahuje mezní hodnoty, poté s dalším zvyšováním klesá, viz Obr. 10. To může souviset s jevem zpětné absorpce a zpětné emise [10].



Obr. 10 Fluorescenční spektra PMMA s příměsí Rhodaminu 6G pro různé koncentrace v mmol/l a) 0,1 b) 0,4 c) 0,54 d) 0,7 e) 0,8 [10].

3.6.1 Fluorescenční stopovací částice

První možností využití fluorescence jsou fluorescenční stopovací částice vyrobené z rhodaminu a pryskyřice. Světlo odražené od částic bude mít odlišnou barvu než laserový paprsek. Pomocí pásmového filtru se pak eliminují nežádoucí odrazy od povrchu a zaznamenává se pouze signál od stopovacích částic [9].

Rhodaminové trasovací částice se dají použít pro měření v kapalině, pro měření v plynech musí být měřicí prostor kvůli toxicitě zcela uzavřen.

3.6.2 Fluorescenční barva

Na povrch modelu lze nanést fluorescenční barvu (např. na bázi rhodaminu), která změní vlnovou délku odraženého světla. Pásmový filtr nasazený na objektiv kamery umožňuje odfiltrovat světlo odražené od povrchu a zachovat tak pouze světlo odražené od částic [6].

V mnoha případech však model nelze natřít, protože by tak došlo ke změně drsnosti povrchu a následně vlastností mezní vrstvy [6].

3.6.3 Fluorescenční model

Fluorescenční barvivo je rozmícháno v materiálu modelu. Uzavření fluorescenčního barviva přímo v materiálu modelu zabrání toxickému působení barviva na okolí, to se nabízí jako dobré řešení toxicity barviva, hlavního omezení při používání fluorescenčních barviv. Při tvorbě modelu je také možné ovlivnit drsnost, což bývá problém při použití fluorescenčních nátěrů. Eliminace odrazu světla použitím fluorescenčního modelu je řešena v této práci.

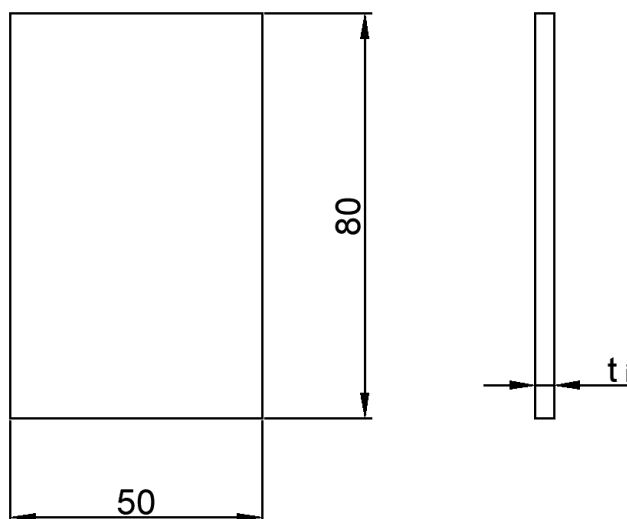
Experimentální část

4 Metodika

V této části je rozebrána příprava vzorků, použitá zařízení, uspořádání experimentu a zapojení měřicí aparatury.

4.1 Fluorescenční vzorky

Vzorky fluorescenčního modelu jsou o rozměrech 50 mm × 80 mm o tloušťkách $t_1 = 2$ mm a $t_2 = 3$ mm (viz Obr. 11). Tvar a rozměry modelu byly navrženy tak, aby přesahovaly aktivní oblast senzoru (viz Obr. 13) a aby se pro výrobu odlévaných vzorků daly použít snadno dostupné silikonové formy.



Obr. 11 Návrh vzorku.

Pro výrobu fluorescenčního modelu byly zvoleny dvě metody:

- a) Odlévání z pryskyřice.
- b) 3D SLA tisk.

Jako aditivum byl použit Rhodamin 6G (C.I. 45160) od společnosti Glentham Life Sciences Ltd (dále jen rhodamin) rozmíchaný v etanolu.

Referenční hodnota koncentrace byla zvolena 0,1 % celkové hmotnosti, což je hodnota používaná pro výrobu fluorescenčních stopovacích částic [18]. Tato hodnota je porovnávána s 50 %, 80 % a 300 % referenční hodnoty.

4.1.1 Odlévání z pryskyřice

Odlévané modely jsou z dvousložkové transparentní epoxidové pryskyřice VEROPAL UV PLUS 100. Poměr složek A:B udávaný výrobcem je 10:4. Hustota pryskyřice je 1090 kg/m³. Doba vytvrzení 72 až 96 hodin.

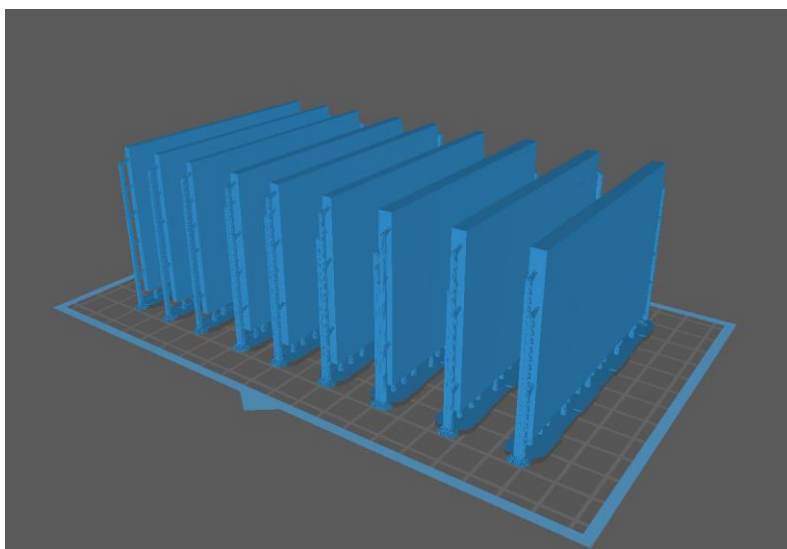
Modely byly odlévány do silikonových forem v 6 sériích viz, Tab. 1. Pro každé odlévání bylo namícháno 145 g pryskyřice, do kterých bylo přidáno dané množství rhodaminu rozmíchané v 10 ml etanolu.

Tab. 1 Koncentrace rhodaminu I.

hmotnostní koncentrace rhodaminu (%)	objem pryskyřice (ml)	hmotnost pryskyřice (g)	hmotnost rhodaminu (g)
0	126	145	0
0,30	126	145	0,435
0,10	126	145	0,145
0,08	126	145	0,116
0,05	126	145	0,073

4.1.2 3D SLA tisk

Modely vyrobené pomocí 3D SLA tisku jsou tisknuty z průhledné pryskyřice Anycubic Basic UV Resin na 3D tiskárně Creality LD006. Hustota pryskyřice uváděná výrobcem je 1100 kg/m³. Modely byly tisknuty ve dvou sériích (viz Obr. 12), hmotnosti a koncentrace jsou uvedeny v Tab. 2. Dané množství rhodaminu bylo rozmíchané v 10 ml etanolu.



Obr. 12 Příprava vzorků pro tisk v programu CHITUBOX V1.9.4

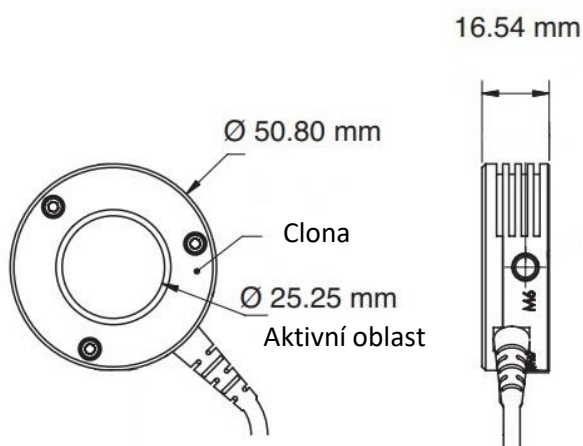
Tab. 2 Koncentrace rhodaminu 2.

hmotnostní koncentrace rhodaminu (%)	objem pryskyřice (ml)	hmotnost pryskyřice (g)	hmotnost rhodaminu (g)
0	300	330	0
0,1	300	330	0,33

4.2 Použitá zařízení

4.2.1 Senzor

EnergyMax-USB J-25MB-HE Energy Sensor od společnosti Coherent (dále jen senzor) umožňuje měřit energii v pulzu nebo průměrný výkon pulzních laserů [11].



Obr. 13 Senzor EnergyMax-USB J-25MB-H -převzato z [11].

Senzor k měření energie v laserovém pulzu využívá pyroelektrický jev. Při změně teploty dochází v nevodivých pevných krystalických látkách k deformaci krystalové mřížky, vzniku elektrického dipólu, který je zodpovědný za vznik elektrického napětí [12]. Aktivní obvod senzoru odebírá proud ze sensorového prvku a převádí jej na napětí, které může přístroj měřit [11].

Pro měření v rámci této práce byl senzor nastaven na měření energie. Rozsah měřené energie laserového impulzu je 16 μJ až 1 J o vlnové délce 190–1200 nm. Aktivní oblast senzoru je 25,25 mm (viz Obr. 13).

Senzor umožňuje nastavit spouštěč měření jak na interní (vlastní detekce laseru senzorem), tak pomocí externího spouštěče. Pro experimenty v rámci této práce byl senzor spouštěn externě, synchronizovaně s kamerou.

Před měřením byla testována funkčnost senzoru a jeho nastavení. Senzor byl upevněn do pozice odpovídající měření a následně byla zjišťována jeho odezva na paprsek laserového ukazovátka. Při testování bylo zjištěno, že šum v laboratoři dosahuje hodnot 131 μJ .

4.2.2 Kamera

Pro experimenty v rámci této práce byla použita kamera Imager sCMOS, která se používá pro záznam obrazu při měření metodou PIV. Pomocí záznamů z kamery se zkoumalo, jak jednotlivé vzorky odráží světlo a jestli je materiál použitý k jejich výrobě vhodný pro použití při měřeních PIV.

Kamera zaznamenává obraz do matice pixelů, kde je každý pixel popsán hodnotou intenzity udávanou v rozsahu 0 – 65 000 (1), kde horní mez je technický limit snímače. Vyšší hodnoty sCMOS snímač nezaznamenává a může být i poškozen. Ohnisková vzdálenost kamery je 45 cm.

4.2.3 Laser

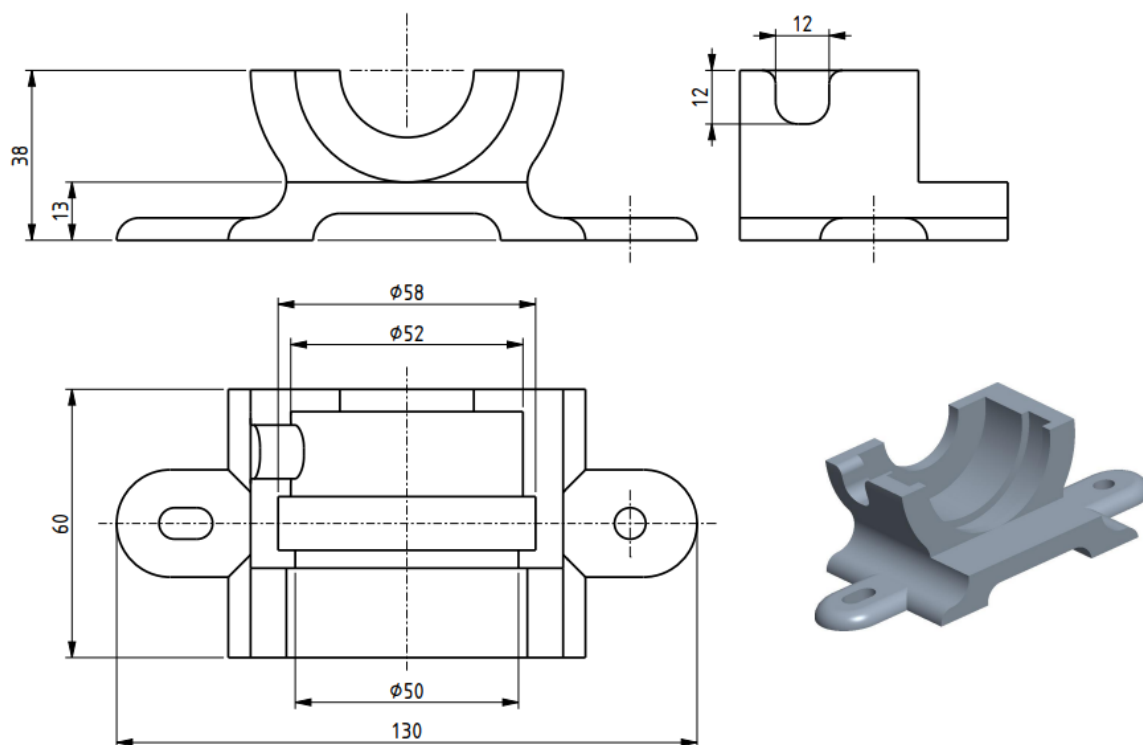
K tomuto experimentu byl využit laser double pulse YAG laser Quantel EverGreen HP, nastaven na 100% výkonu (340 mJ) výkonu při frekvenci 15 Hz.

4.2.4 Filtr zeleného světla

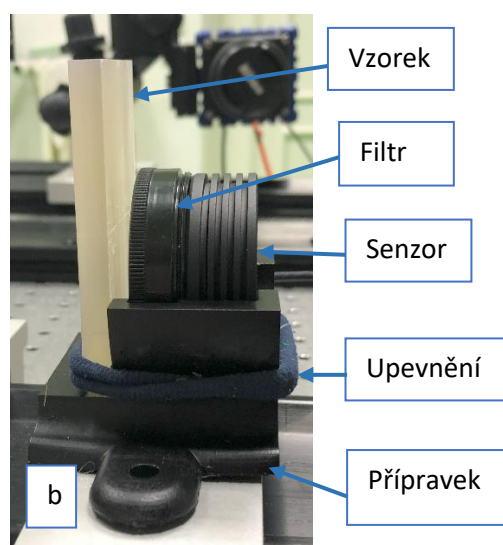
Filtr zeleného světla je pásmový filtr, který propouští záření s vlnovými délkami odpovídajícími zelenému světlu. Pásmový filtr umožňuje blokovat světlo odražené od rhodaminového povrchu. Senzor i kamera byly opatřeny pásmovým filtrem 532 nm se šířkou pásma 20 nm.

4.2.5 Přípravek na upevnění vzorku

Přípravek na upevnění vzorku (viz Obr. 14 a Obr. 15) byl vytištěn na stejné 3D tiskárně jako vzorky. Byl navržen tak, aby filtr zeleného světla těsně dosedal na senzor, aby se s jeho pomocí daly snadno upevnit vzorky různých tlouštěk a také, aby se dal snadno připevnit k optickému stolu, viz Obr. 14. Před měřením byl přípravek nabarven černou barvou, aby se zabránilo rušivým odrazům světla.



Obr. 14 Přípravek na upevnění vzorku (výkres/nákres).

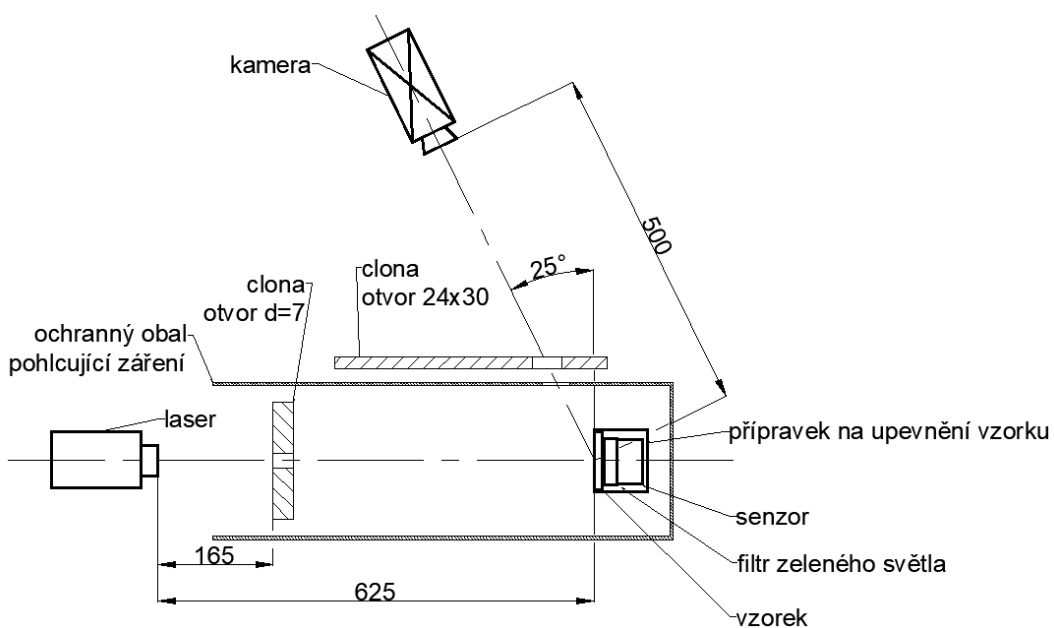


Obr. 15 Přípravek na upevnění vzorku:

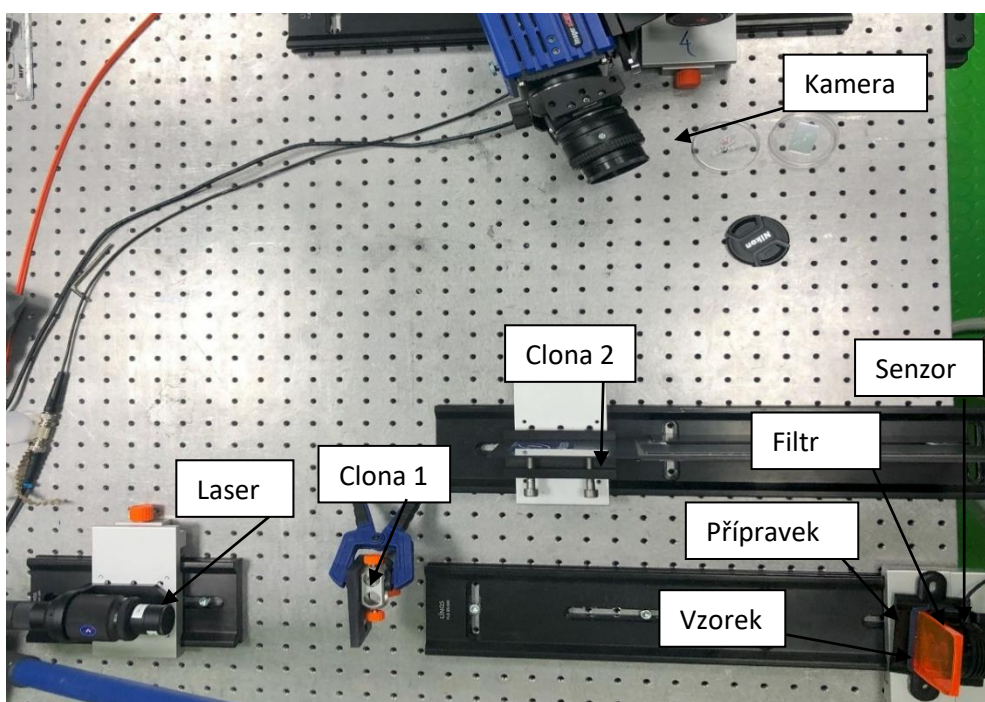
a) půdorys – před nabarvením b) bokorys – nabarvený.

4.3 Uspořádání experimentu

Uspořádání experimentu je znázorněno na Obr. 16 a Obr. 17. Při stavbě aparatury experimentu bylo třeba brát ohled na ohniskovou vzdálenost objektivu kamery. Clona 2 je nastavena tak aby kamera nezachycovala odrazy laserového světla od přípravku na upevnění vzorku. Clona 1 reguluje průměr paprsku laseru tak, aby jeho průměr nebyl větší než snímací plocha senzoru (Obr. 13). Senzor, filtr zeleného světla a vzorek jsou upevněny pomocí přípravku (viz Obr. 15)



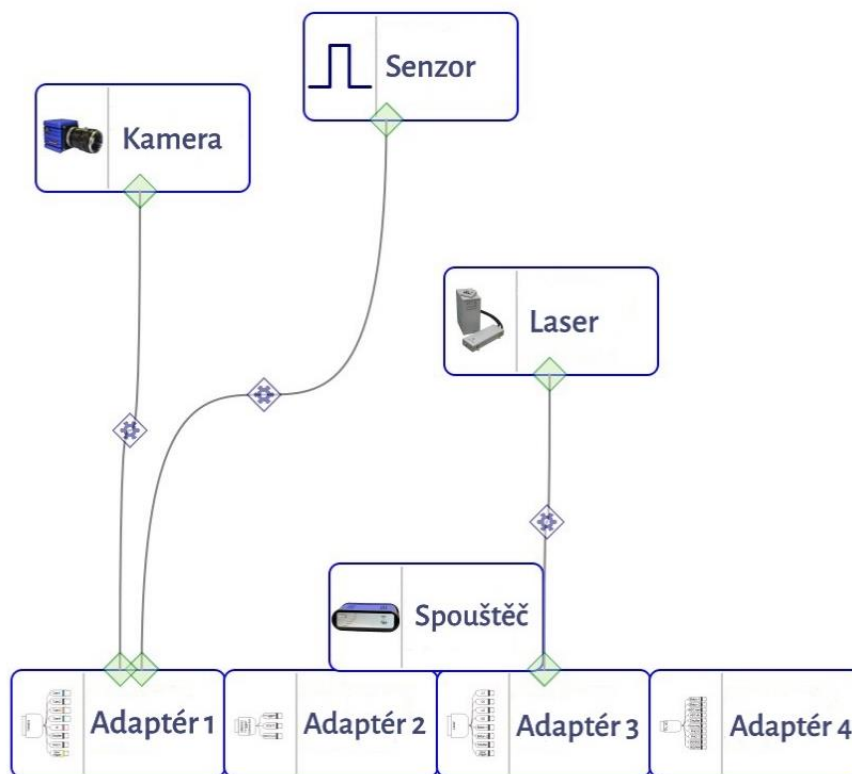
Obr. 16 Schéma rozložení experimentu.



Obr. 17 Rozložení experimentu.

4.4 Zapojení měřící aparatury

Na Obr. 18 je zobrazeno schéma měřící aparatury v uživatelském prostředí softwaru DaVis 10.2. Synchronizované spuštění laseru, kamery i senzoru zajišťuje spouštěč (Programmable timing unit /trigger).



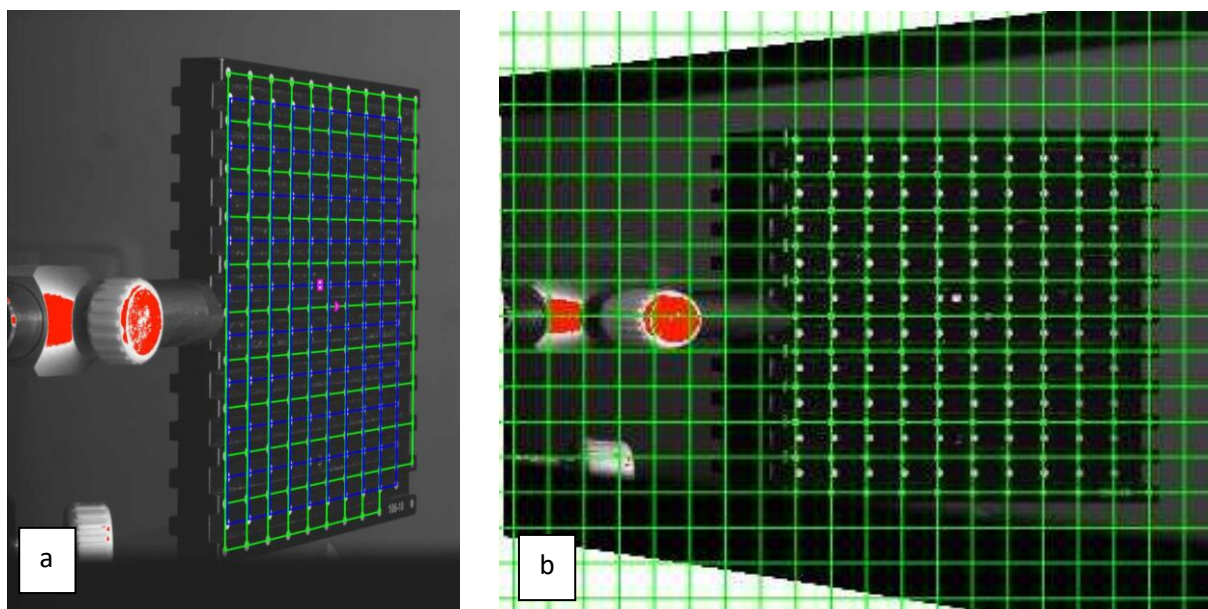
Obr. 18 Blokové schéma zapojení experimentu.

5 Realizace experimentu

U vzorků se měřila energie laserového světla, prošlého skrz vzorek, senzorem a pomocí kamery z PIV systému se hodnotilo množství odraženého světla.

5.1 Zaostření kamery

Z důvodu natočení objektové roviny (rovina vzorku) vůči obrazové rovině (rovina obrazového snímače) byl obraz zaostřen pomocí Scheimpflugova adaptéru. Následně byl proveden záznam kalibračního terče od společnosti LaVision typ 106-10, který se umístil do roviny objektu. Obraz byl poté softwarově transformován do roviny snímače obrazu. Proces kalibrace je znázorněn na Obr. 19.



Obr. 19 Záznam kalibračního terče a) surový záznam, b) záznam po kalibraci.

5.2 Testování povlaku senzoru

Před měřením bylo nutné ověřit, zda laserový paprsek nepoškodí ochranný povlak senzoru, k tomuto účelu bylo použito sklíčko pro test poškození, které je součástí balení senzoru. Při testování k viditelnému poškození nedošlo, viz Obr. 20.



Obr. 20 Sklíčko pro test poškození – po testu poškození

5.3 Parametry měření

Jednotlivá měření probíhala po dobu 1 hodiny nebo do hodnot intenzity kritických pro poničení kamery (65 000 jednotek). Výkon laseru byl nastaven na 100 %, snímací frekvence pro kameru i senzor byla 15 Hz.

5.4 Vzorčky

Pro experiment bylo vybráno celkem 14 vzorků, 4 vzorky z tisku, 10 odlitých. Vzorčky jsou označené ve formátu pp-t-v: p – hmotnostní koncentrace rhodaminu, t – tloušťka v mm a v – způsobu výroby tj. o – odlitek nebo t – tisk.

Protože výrobce nestanovuje přesné smrštění při vytvrzování pryskyřice, reálná tloušťka modelů je odlišná od navrhované, viz Tab. 3.

Tab. 3 Označení jednotlivých modelů a jejich tloušťky.

model	0,3-4-O	0,3-3-O	0,1-4-O	0,1-3-O	0,08-4-O	0,08-3-O	0,05-4-O
t (mm)	3,5	2,8	3,5	2,4	3,3	2,6	3,3
model	0,05-3-O	0-4-O	0-3-O	0,1-4-T	0,1-3-T	0-4-T	0-3-T
t (mm)	2,5	3,5	2,7	4,1	3,2	4,2	3,2

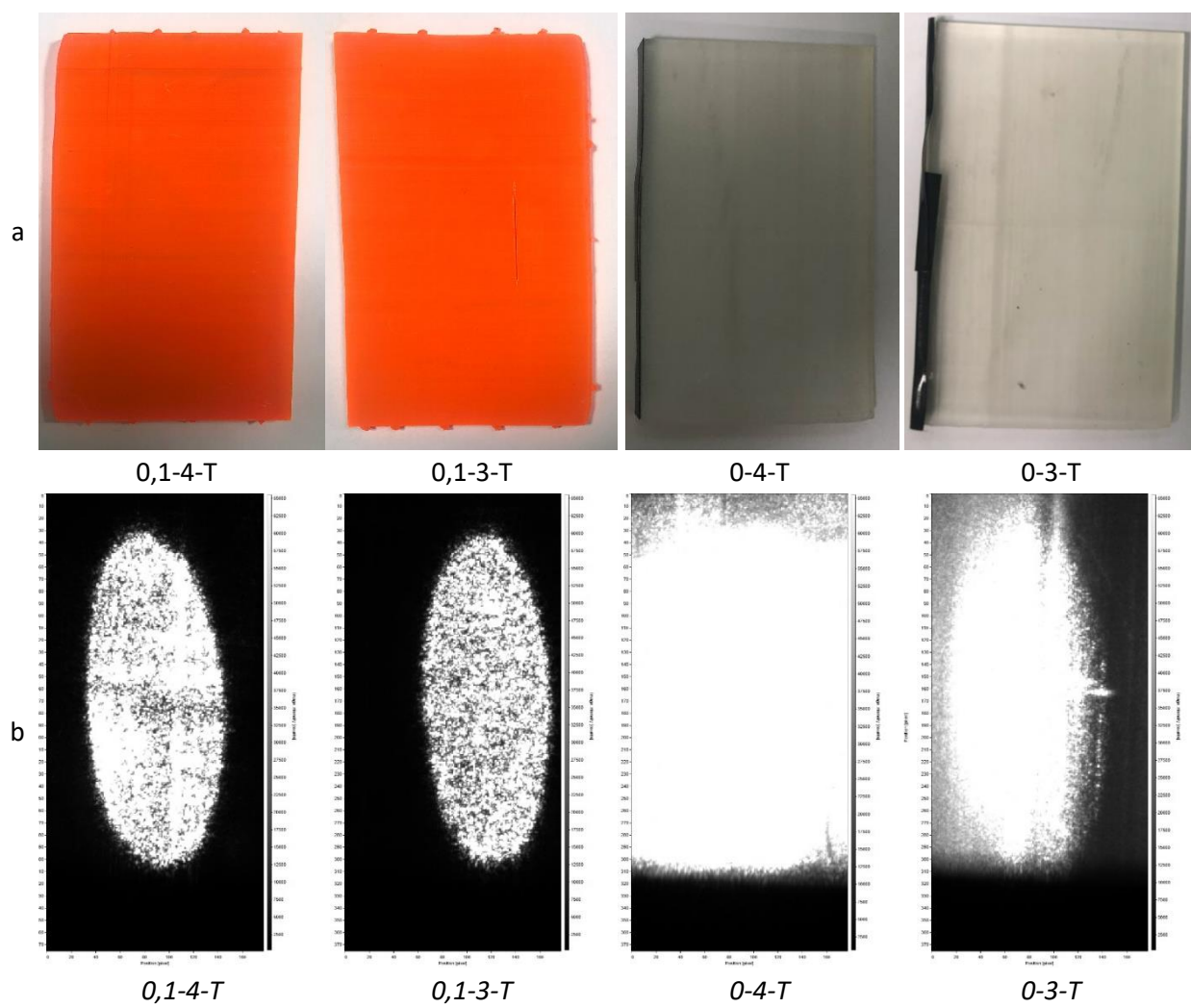
6 Vyhodnocení výsledků experimentu

6.1 Tištěné vzorky

Při měření tištěných vzorků bylo zjištěno, že intenzita světla odraženého od vzorků přesahuje rozsah kamery (65 000 jednotek). Přidáním rhodaminu došlo ke snížení rozptylu odraženého světla o vlnové délce $532 (\pm 10)$ nm (viz Obr. 21) a snížil se lom laserového světla do těla vzorku.

Senzor zaznamenal energii prošlého světla pouze u vzorků bez rhodaminu. Maximální energie prošlého světla je u vzorku 0-4-T 598 μ J a u vzorku 0-3-T 542 μ J.

Protože intenzita světla odraženého od vzorků přesahuje rozsah kamery, metoda 3D SLA tisku není pro výrobu čirých modelů a modelů v kombinaci s rhodaminem vhodná pro PIV měření.



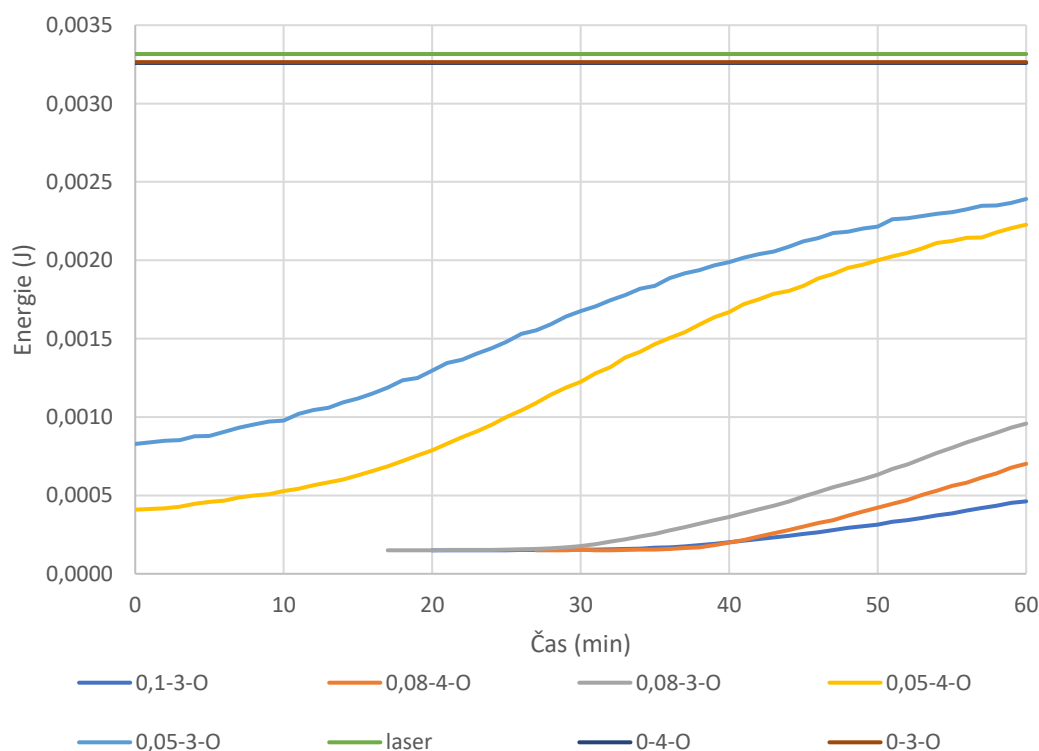
Obr. 21 Tištěné vzorky: a – záznam vzorků po měření b – kamerový záznam.

6.2 Odlévané vzorky

Pro měření bylo vybráno deset vzorků z toho dva čiré bez příměsi rhodaminu. U odlévaných vzorků intenzita odraženého světla nepřesahuje 65 000 jednotek. Měření probíhala po dobu 1 h. Při měření bylo možné pozorovat postupný rozpad rhodaminu tento rozpad je patrný, podíváme-li se na graf energie prošlého světla viz Obr. 22. Je také vidět na fotografiích vzorků po měření viz Obr. 24

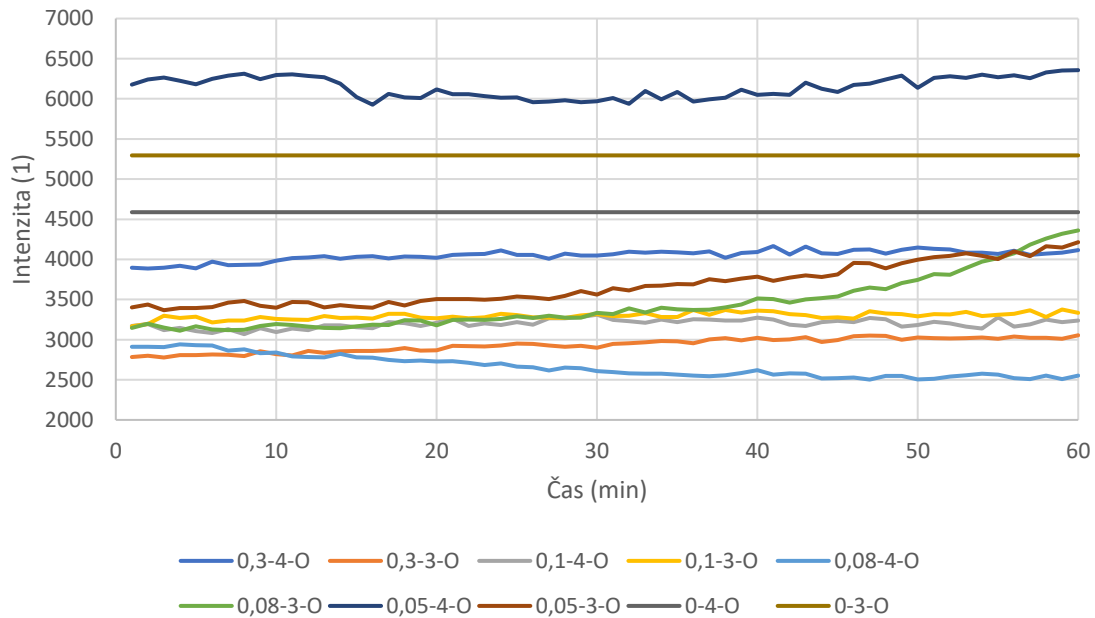
Graf na Obr. 22 zobrazuje, jak se během hodiny měnila energie laserového paprsku, která prošla vzorky. V grafu jsou zaneseny hodnoty vzorků, u kterých na konci měření hodnota naměřené energie prošlého světla byla vyšší než hodnota šumu (tj. 131 μJ). Vzorkem s nejvyšší koncentrací rhodaminu, u kterého laserové světlo prošlo je 0,1-3-O, kde k dostatečnému rozpadu rhodaminu došlo za 20 min. Vzorek, u kterého během 1 h došlo k dostatečnému rozpadu za nejdelší časový úsek je 0,08-4-O, a to za 27 min.

U vzorků bez rhodaminu bylo měření zkráceno na 30 s a v grafu je pak pro orientaci zanesena průměrná naměřená hodnota. Stejně je v grafu zanesena i hodnota energie laserového paprsku bez vzorku



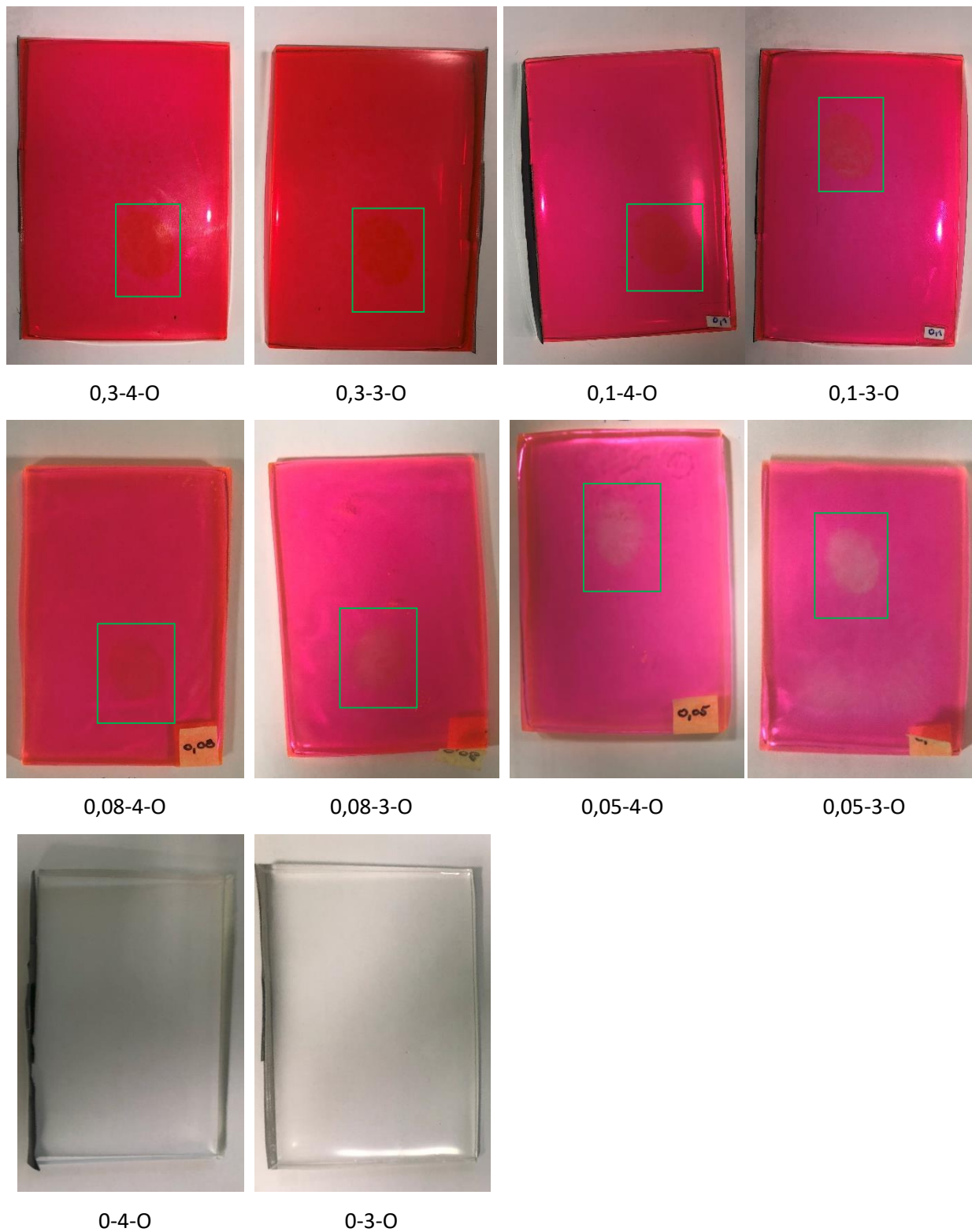
Obr. 22: Časový průběh energie paprsku laseru prošlé vzorkem.

Při srovnání dat z kamery, viz Obr. 23, je hlavním společným prvkem, kterým lze chování vzorků popsat, že vzorky s rhodaminem mají nižší intenzitu odraženého světla než čiré vzorky. Výjimku tvoří vzorek 0,05-4-O, u kterého se v místě měření nacházel větší počet vzduchových bublin, který zřejmě ovlivnil výsledné hodnoty.

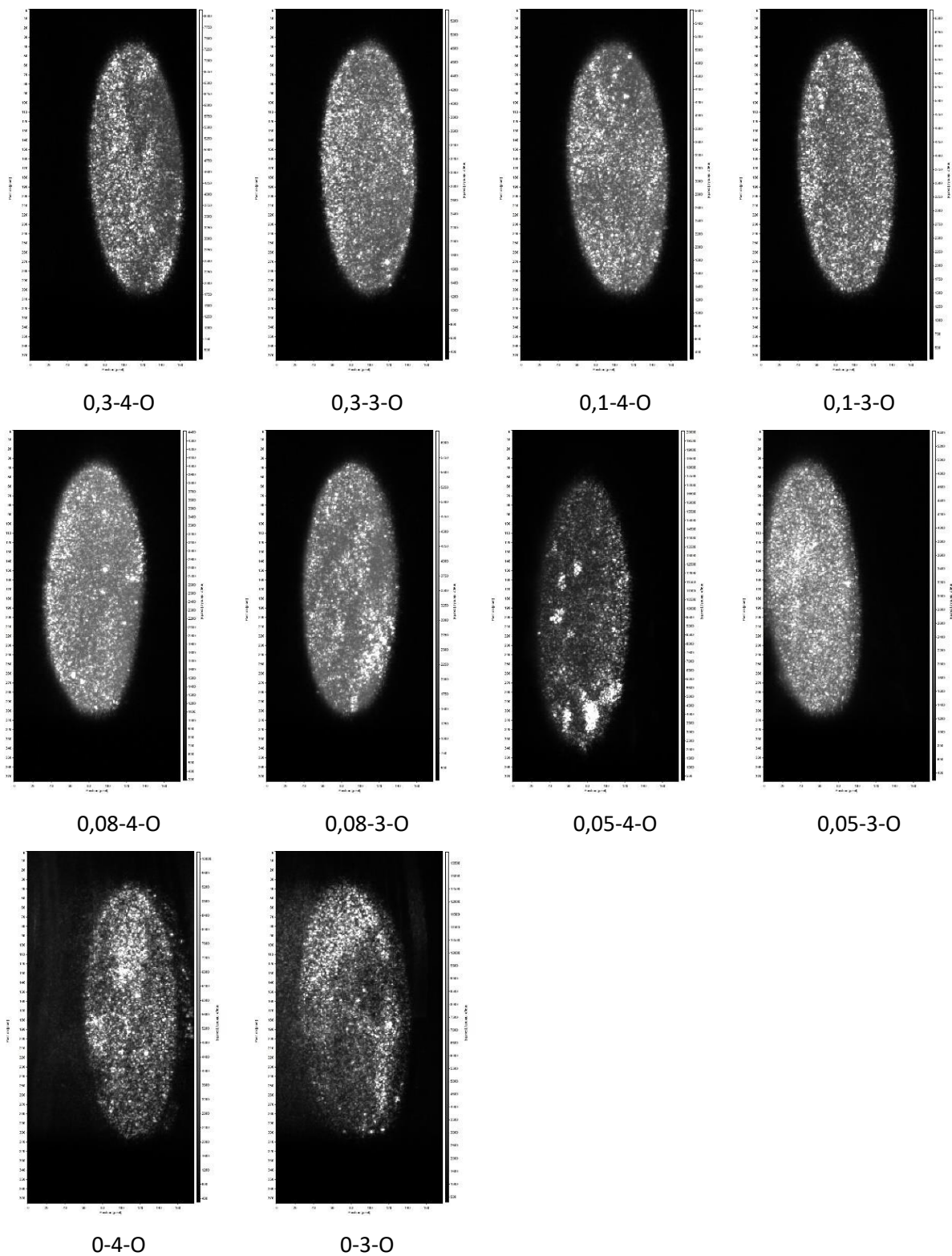


Obr. 23: Časový průběh intenzity světla odraženého od vzorku.

Dalším společným znakem vzorků je, že rhodamin ve vzorku snižuje lom laserového světla do těla vzorku, toto je patrné při porovnání snímků vzorků viz Obr. 25.

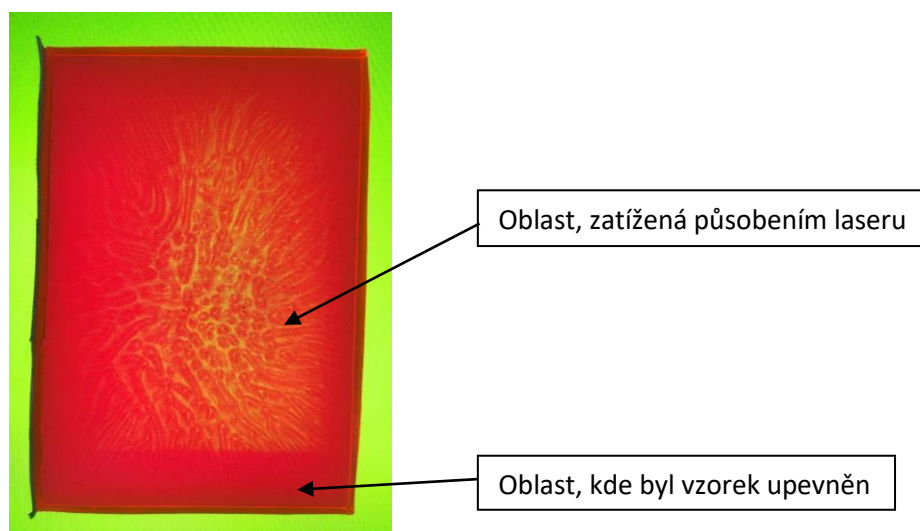


Obr. 24: Modely odlévaných vzorků – zeleně označená propálená oblast.

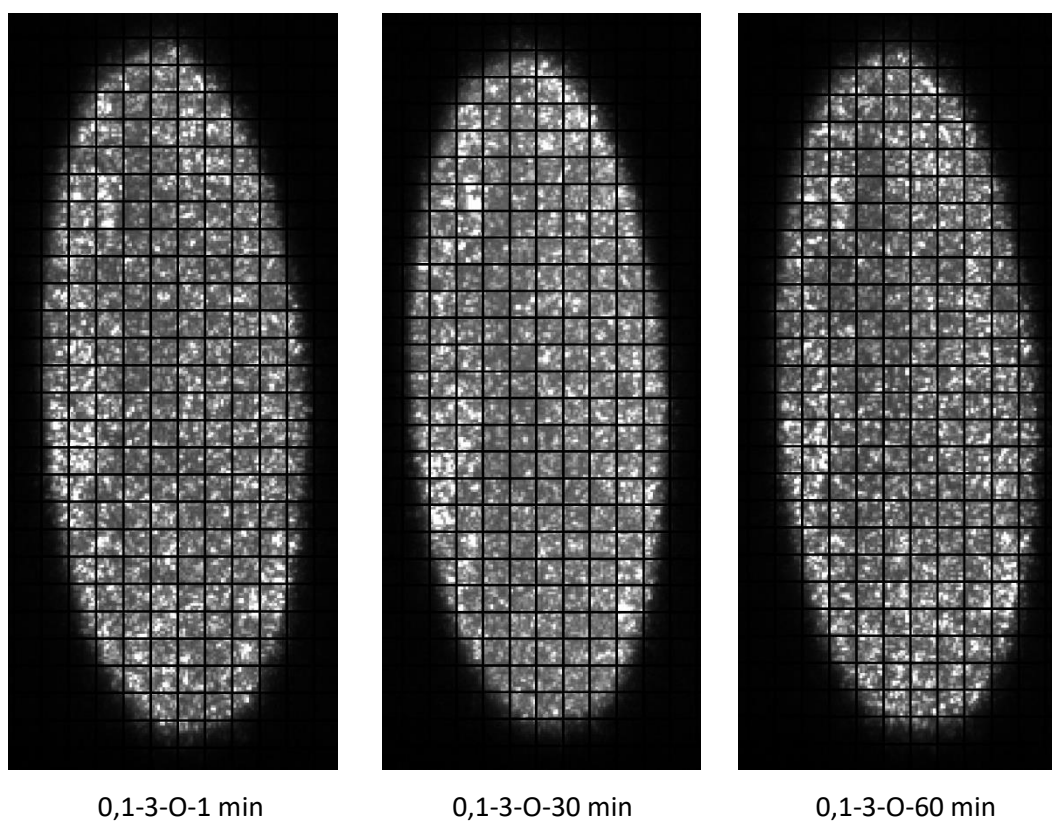


Obr. 25 Kamerové záznamy odlévaných vzorků.

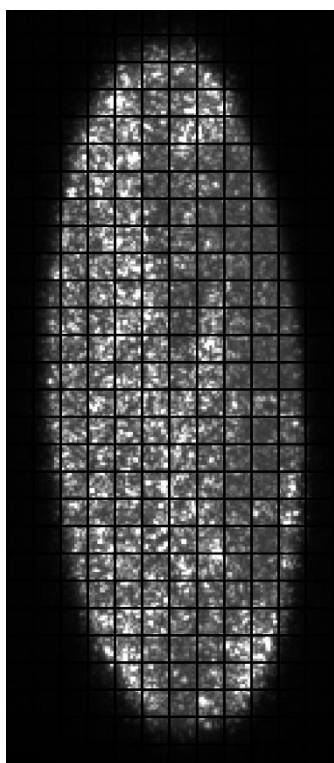
U odlévaných vzorků můžeme pozorovat, že rhodamin se v pryskyřici nejen rozpadá, ale také roztéká. Tato vlastnost je nejlépe viditelná na vzorku, který byl použit pro kalibraci laseru a na nějž svítil laserový paprsek o větším průměru (Obr. 26). Tato vlastnost je také důvodem nerovnoměrného kolísání intenzity, kterou můžeme pozorovat na Obr. 23 a také Obr. 27.



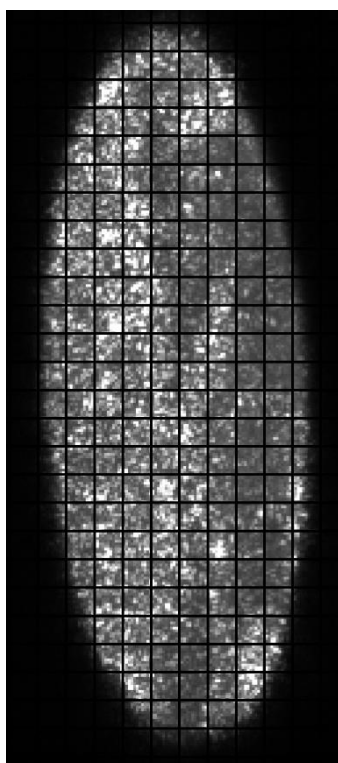
Obr. 26 Roztékání rhodaminu.



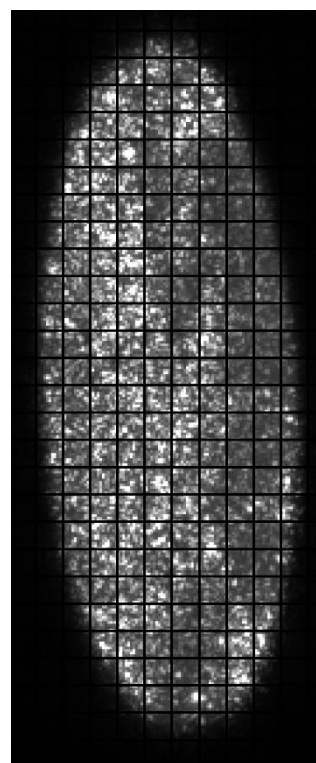
Obr. 27 Kamerové záznamy odlévaných vzorků v různých časech měření. 1/2



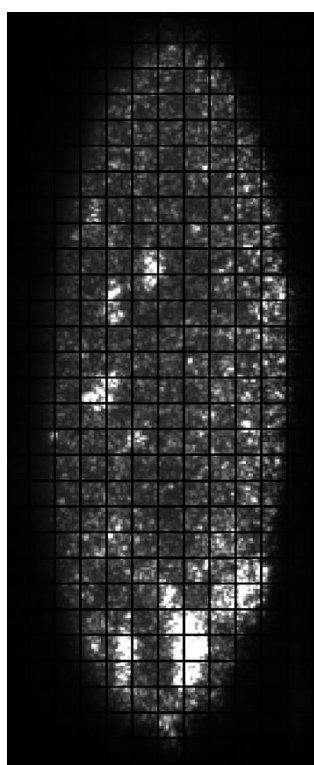
0,3-4-O-1 min



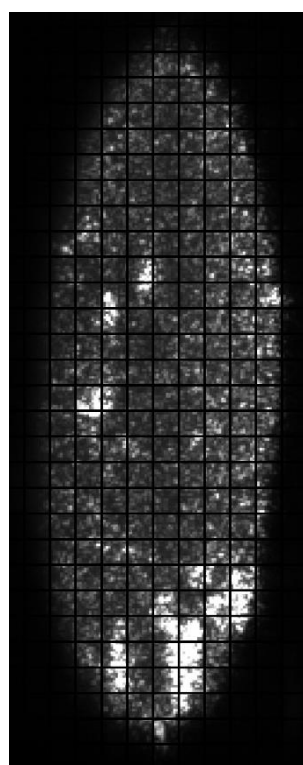
0,3-4-O-30 min



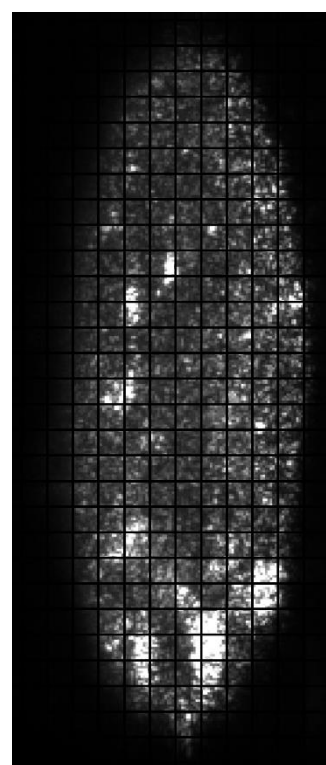
0,3-4-O-60 min



0,05-4-O-1 min



0,05-4-O-30 min



0,05-4-O-60 min

Obr. 27 Kamerové záznamy odlévaných vzorků v různých časech měření.2/2

Závěr

Cílem této práce bylo určení a porovnání optických vlastností materiálů s cílem nalezení vhodné konfigurace pro výrobu dílů pro PIV měření. V teoretické části byla popsána metoda PIV, optické jevy na rozhraní a byly zde rozebrány metody s jejichž pomocí se snižuje množství rozptýleného světla a odrazů při PIV měření. Tyto poznatky poté byly využity k výrobě fluorescenčních modelů.

Při výrobě modelů byla použita technologie odlévání z epoxidové pryskyřice a 3D SLA tisk s použitím aditiva. Jako aditivum byl použit rhodamin 6G, který měl zajistit změnu vlnové délky laserového svazku při průchodu stěnou modelu a tím snížit míru odraženého a rozptýleného světla.

U modelů byla experimentálně zkoumána intenzita odraženého světla a energie laserového paprsku prošlého skrz. Metoda 3D SLA tisku se ukázala jako nevhodná pro výrobu modelů pro PIV měření. Struktura povrchu tištěných vzorků, měla za následek zvýšení množství odraženého světla natolik, že přesahovalo rozsah kamery. Možnost použití vzorků odlévaných z epoxidové pryskyřice se ukázala jako problematická. Použití rhodaminu sice snížilo množství odraženého a rozptýleného světla, ale měření bylo ovlivněno nečistotami a vzduchovými bublinkami, které vnikly do vzorků z okolí při odlévání. Další nevhodnou vlastností odlévaných vzorků bylo nerovnoměrné kolísání intenzity odraženého světla, protože při zásahu vzorku laserem docházelo k roztékání rhodaminu.

Lepších výsledků by mohlo být dosaženo při preciznější výrobě vzorků s použitím jiného typu pryskyřice, doporučuje se pryskyřice s kratší dobou vytvrzení k odformování. Lepší výsledky by mohlo přinést i použití jiného typu rhodaminu. V případě tohoto měření byl výkon laseru nastaven na 100 % výkonu, do budoucna se doporučuje výzkum rozšířit o měření s více stupni výkonu laseru a větší rozmanitost tloušťek a koncentrací.

Seznam literatury

- [1] NOVOSAD, Jan, Jaroslav PULEC a Petra DANCOVA. Applicability of the PIV system for velocity field measurement inside the ultrasonic flowmeter. MATEC Web of Conferences. 345. 00024., 2021.
- [2] KOPECKÝ, Václav, Laserové anemometrie. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006. ISBN 80-7083-945-7.
- [3] LAVISION GMBH. FlowMaster: Product manual. Göttingen, Germany, 2021.
- [4] BISEL, Tucker, Jerry DAHLBERG, Tony MARTIN, Spencer OWEN, Russell KEANINI, Peter TKACIK, Nithin NARAYAN a Navid GOUDARZI. A Comparison of Flat White Aerosol and Rhodamine (R6G), Fluorescent Paints and Their Effect on the Results of Tomographic PIV Measurements. 2017.
- [5] DEPARDON, S., J. LASSERRE, J. BOUEILH, L. BRIZZI a B. JACQUES. Skin friction pattern analysis using near-wall PIV. Experiments in Fluid, 2005.
- [6] ADATRAO, Sagar a Andrea SCIACCHITANO. Elimination of unsteady background reflections in PIV images by anisotropic diffusion. Measurement Science and Technology 30. 035204, 2019.
- [7] ROSTAMY, N., D. SUMNER, D. J. BERGSTROM a J. D. BUGG. Local flow field of a surface-mounted finite circular cylinder. Fluids Struct. 34 105-22. 2012.
- [8] PATERNA, Enrico, P. MOONEN, Viktor DORER a Jan CARMELIET. Mitigation of surface reflection in PIV measurements. Measurement Science and Technology. 24. 057003, 2013.
- [9] PEDOCCHI, Francisco, J. Ezequie MARTIN a Marcelo H. GARCÍA. Inexpensive fluorescent particles for large-scale experiments using particle image velocimetry. Experiments in Fluids 45, č. 1: 183-186, 2008.
- [10] ACHAMMA, Kurian, Nibu A. GEORGE, Binoy PAUL, V. P. N. NAMPOORI a C. P. G. VALLABHAN. Studies on Fluorescence Efficiency and Photodegradation of Rhodamine 6G Doped PMMA Using a Dual Beam Thermal Lens Technique Studies on Fluorescence. Laser Chemistry., sv. Vol. 20(2-4), pp. 99-110, 2017.
- [11] EnergyMax-USB/RS Sensor Guide, January 2011.
- [12] ERHART, J. a P. DESENSKÝ. Souhrnný sborník Veletrhu nápadů učitelů fyziky [online]. [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/17-07-Erhart.html>.
- [13] THEUNISSEN, R., Fulvio SCARANO a M.L. RIETHMULLER. On improvement of PIV image interrogation near stationary interfaces. Experiments in fluids. (45(4), 557-572, 2008.