

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



DIPLOMOVÁ PRÁCE

2018

BC. JAN DOBEŠ

Jméno autora: Jan Dobeš

Název DP: Studie možností měření hrubé vodní disperze v novém parním tunelu.

Anglický název: Study of possibilities for the gross water dispersion measurement, held in the new steam tunnel.

Akademický rok: 2017/2018

Ústav/Odbor: Ústav energetiky

Vedoucí DP: Ing. Ondřej Bartoš Ph.D.

Bibliografické údaje:

Počet stran:	105
Počet obrázků:	73
Počet tabulek:	16
Počet grafů:	30

Klíčová slova: Parní tunel, měřicí trať, dýza, vodní disperze, kamera, dioda, fotogrammetrie, Matlab, obrazová analýza, Weberovo číslo, Malvern Spraytec, fotogrammetrická metoda, atomizace

Keyword: Steam tunnel, experimental tunnel, nozzle, water dispersion, camera, diode, photogrammetry, Matlab, image analysis, Weber number, Malvern Spraytec, photogrammetric method, atomization

Anotace: Diplomová práce se zabývá studiem chováním vodních filmů v proudu tekutiny a jejich postupnou atomizací. V práci je popsán postup sestavení konstrukce parního tunelu v halové laboratoři Ústavu energetiky FS ČVUT na Julisce, na kterém byly provedeny experimenty fotogrammetrickou metodou a metodou Malvern Spraytec.

Abstract: The diploma thesis is focused on the study of water film behavior in the fluid flow and water film atomization. The thesis describes the construction of a steam tunnel at the Institute of Power Engineering CTU laboratory Juliska, where the experiments were carried out using a photogrammetric and Malvern Spraytec method.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

.....

Podpis

Poděkování:

Rád bych poděkoval vedoucímu mé práce, Ing. Ondřejovi Bartošovi Ph.D., který mi radil při plnění stanovených úkolů a přinášel náměty na další možný vývoj, které mě vedly k úspěšnému dokončení úkolu.

1. Obsah

1. Obsah.....	6
2. Seznam symbolů, indexů a zkratek	10
3. Úvod	12
4. Dýzy - současný stav	14
4.1.Motivace k provedení rešerše	14
4.2.Příklady parních vysokorychlostních dýz	14
4.2.1. Dýza Juliska (původní) - Ústav energetiky FS ČVUT	14
4.2.1.1. Parametry.....	14
4.2.1.2. Základní popis	14
4.2.1.3. Schéma.....	15
4.2.2. Technologický institut v Karlsruhe - Barschdorfova dýza	15
4.2.2.1. Základní popis	15
4.2.2.2. Schéma.....	15
4.2.3. Japonsko, Tokyo Shibauria Electric - T. Ikeda, A. Suzuki dýza.....	16
4.2.3.1. Základní popis	16
4.2.3.2. Schéma.....	16
4.2.4. Centra Electricity Research Laboratories, Leatherhead, Surrey - M. J. Moore P. T. Waltera R. I. Crane B. J. Davidson.....	16
4.2.4.1. Základní popis	16
4.2.4.2. Schéma.....	17
4.2.5. Turbomachine R&D Department (TX-2), Brown - Gyarmathy	18
4.2.5.1. Parametry.....	18
4.2.5.2. Základní popis	18
4.2.5.3. Schéma.....	18
4.2.6. Technologický institut v Karlsruhe - Schnerrova dýza	18
4.2.6.1. Parametry.....	18
4.2.6.2. Základní popis	18
4.2.6.3. Schéma.....	19
4.2.7. Doorey dýza/turbína.....	19
4.2.7.1. Základní popis	19

4.2.7.2. Schéma	19
4.2.8. University of Birmingham - Bakhtar dýza/lopatky	20
4.2.8.1. Parametry	20
4.2.8.2. Základní popis	20
4.2.8.3. Schéma	21
4.2.9. Gas turbine test cell - Evans, Dawes, Zhang	21
4.2.9.1. Parametry	21
4.2.9.2. Základní popis	22
4.2.9.3. Schéma	22
4.2.10. Wet steam turbine cascade facility - Jacob Andrew McFarland	23
4.2.10.1. Parametry	23
4.2.10.2. Základní popis	23
4.2.10.3. Schéma	23
4.3. Další experimenty na dýzách	24
4.3.1. Experiment s expanzí do vodní lázně	24
4.4. Shrnutí současného stavu	24
5.1. Měřicí trať pro experimenty SVUSS	26
5.2. Separace kapalných fází na obtékaných površích	27
5.2.1. Závěry z experimentu SVUSS	29
6. Konstrukce experimentální trati - Juliska	30
6.1. Požadované parametry - zadání	30
6.2. Vlastní návrh měřicí trati	32
6.2.1. Návrh měřicí trati	32
6.2.2. Návrh a rozložení měřicí instrumentace	35
6.2.2.1. Fotogrammetrické měření	35
6.2.2.2. Měření tlaku	36
6.2.2.3. Měření teploty	38
6.2.2.4. Návrh umístění snímačů (složitá varianta)	39
6.2.2.5. Návrh umístění snímačů (Jednoduchá varianta)	40
6.3. Výsledné provedení	41
7. Rozměrová analýza	45
7.1. Výběr metody měření	45

7.2.Granulometrie	45
7.3.Jednotlivé metody granulometrie	46
7.3.1. Sítová metoda	46
7.3.1.1. Křivka rozsevu	47
7.3.1.2. Křivka propadu	47
7.3.1.3. Křivka četnosti.....	47
7.3.2. Hydrometrická a pipetovací metoda	48
7.3.3. Metoda laserové difrakce (LDM)	49
7.3.3.1. Fraunhoferova difrakce.....	49
7.3.3.2. Mieova teorie.....	50
7.3.3.3. Zařízení pro laserovou metodu - Malvern Spraytec.....	50
7.3.4. Optická analýza pomocí mikroskopu	51
7.4.Testovací měření, popis průběhu a problémů	52
7.4.1. Závěry testovacího měření	56
7.5.Experiment - porovnání sítové analýzy a optického vyhodnocení.....	56
7.5.1. Návrh experimentu.....	56
7.5.2. Výsledky granulometrie	56
7.5.2.1. Výsledky	58
7.5.3. Fotogrammetrie.....	59
7.5.4. Porovnání výsledků.....	61
8. Vlastní experiment na dýze	62
8.1.Návrh a cíle experimentu	62
8.1.1. Malvern Spraytec měření	63
8.1.2. Měření pomocí kamery.....	63
8.2.Kalibrace experimentu	63
8.2.1. První kalibrační měření na dýze.....	63
8.2.2. Vyhodnocení kalibračních měření	64
8.2.2.1. Kalibrace tlakových snímačů.....	64
8.2.2.2. Kalibrace rozlišení kamery	65
8.2.2.3. Kalibrace délky záblesku diody	66
8.3.Provedení experimentu.....	69
8.3.1. Vyhodnocení teploty.....	69

8.3.2. Vyhodnocení tlaku a výpočet rychlosti	69
8.3.3. Určení kritických parametrů dýzy	69
8.4. Měření Malvern Spraytec	70
8.4.1. Výsledky měření - Malvern Spraytec	70
8.4.2. Vyhodnocení měření - Malvern Spraytec	78
8.5. Měření kamera	78
8.5.1. Výsledky měření - kamera	79
8.5.1.1. Vyhodnocení objemu tekutiny	80
8.5.1.2. Závěr - vyhodnocení objemu tekutiny	83
8.5.1.3. Určení Weberova čísla	83
8.5.2. Vyhodnocení měření - kamera	95
9. Návrh dalších experimentů	96
10. Závěr a shrnutí	97
11. Zdroje	98
12. Seznam obrázků	101
13. Seznam tabulek	104
14. Seznam grafů	104

2. Seznam symbolů, indexů a zkratek

FS ČVUT – Fakulta strojní, České vysoké učení technické

SVUSS – Státní výzkumný ústav pro stavbu strojů

SW – Software

Polydisperzní systém - Soustava obsahující částice mnoha různých velikostí, charakterizovaná spojitou distribuční křivkou

P_{in} – Vstupní tlak

T_{in} – Vstupní teplota

P_0 – Vstupní tlak

T_0 – Vstupní teplota

η – Účinnost

CFD – Computational fluid dynamics obor mechaniky tekutin, který používá numerickou analýzu a datové struktury pro řešení komplexních problémů proudění tekutin. .

W_r – Weberovo číslo

σ – Povrchové napětí

ρ'' – Hustota směsi

D – Průměr kapičky

W_r – Relativní rychlost, která se spočítá jako rozdíl rychlosti plynu a kapičky

LED – Light emitting diod/Světlo emitující dioda

T_s – Teplota v ustalovací nádrži

P_s – Tlak v ustalovací nádrži

Δm – Hmotnost zrn s rozměrem ok x a větších

m – Hmotnost celkové navážky vzorku

$R(x)$ – Křivka rozsevu

$R(x)$ – Křivka propadu

LDM – Metoda laserové difrakce

s – Dráha

w – Rychlost kapičky

t – Čas

T^*/T_{krit} – Kritická teplota

W^*/W_{krit} – Kritická rychlost

ρ_{krit} – Kritická hustota

A_{krit} – Kritický průřez

m_{krit} – Kritická hmotnost

R – Molární plynová konstanta

κ – Poissonova konstanta

M – Machovo číslo

3. Úvod

V této diplomové práci se budu věnovat problematice detekce a měření vlastností kapiček při průchodu dýzou. Celá tato práce je součástí rozsáhlého výzkumu, který je prováděn na pracovišti Ústavu energetiky FS ČVUT v Praze. Jejím hlavním účelem je přinést ucelené srovnání již existujících experimentů a na základě jejich znalostí provést návrh vlastní měřící trati (parního tunelu) a provést základní sadu experimentů.

Celý tento výzkum má za cíl vést k hlubšímu pochopení mechanismů vzniku kapiček v proudu páry procházející dýzou, u které dochází k expanzi. Průchod dýzou v těchto experimentech simuluje průchod páry jednotlivými stupni turbíny. Výsledky výzkumu, ať už se jedná o mechanismus vzniku kapiček, tak o způsoby detekce těchto kapiček, mohou přispět k zavedení opatření pro reálný provoz. V reálném provozu se s jevem zkoumaným při experimentu na dýze setkáváme u parních turbín v elektrárnách, kde mohou kapičky způsobovat obtíže. Mezi obtíže způsobené vznikem kapiček v turbíně patří energetická ztráta vlhkostí páry. Vznikající vodní disperze zapříčiňuje opotřebení samotných lopatek turbíny. Při redukci vzniku vodní disperze by mohlo dojít k prodloužení životnosti těchto částí.

Úvodní část diplomové práce se věnuje rešerši již existujících experimentů a je v ní kladen důraz na rozbor základních parametrů používaných dýz. V této části získá čtenář nejen představu o technických parametrech dostupných zařízení, ale dozví se i konkrétní informace o způsobu, jakým jsou měřeny a vyhodnocovány základní parametry.

V druhé části se zabývám studiem experimentů provedených v SVUSS, které se zabývají atomizací vodních filmů v proudící tekutině. Tyto experimenty mi posloužily jako základní předpoklad pro mé experimenty uvedené v praktické části této práce.

V další části se nejprve věnuji popisu provozních parametrů vlastní dýzy, která je dílem probíhajícího výzkumu na Ústavu energetiky FS ČVUT a návrhu měřící trati. Vlastní návrh trati je proveden pomocí 3D vizualizace jednotlivých komponent za pomoci SW Autodesk Inventor. V této sekci je také detailně zdokumentována instrumentace použitá pro měření, včetně návrhů jejího rozmístění v rámci trati.

Dále se zabývám problematikou měřících metod a kladu důraz na měřící fotogrammetrickou metodu a vyhodnocení měření rozptylu paprsku laseru pomocí přístroje Malvern Spraytec. Těchto metod využívám v experimentální části pro měření na dýze. V této části demonstрую funkci fotogrammetrické

metody pro polydisperzní systémy na zkušebních experimentech se vzorky uhelného prášku a konfrontují přesnost této metody s metodou síťové analýzy. Síťová analýza se používá pro stanovení granulometrických vlastností uhlí již po několik desetiletí, a proto mi slouží jako vhodná referenční metoda.

V poslední části diplomové práce se věnuji samotným experimentům na dýze a jejich vyhodnocení. Před samotným měřením popisují nezbytná kalibrační měření, která slouží k nastavení měřících senzorů tak, aby poskytovaly relevantní a přesná data.

Hlavním úkolem této práce je ověřit předpoklady a použitelnost navržených měřících metod. Získaná data budou sloužit pro návrh budoucích experimentů v této oblasti na měřící trati sestavené v halové laboratoři Ústavu energetiky FS ČVUT na Julisce.

4. Dýzy - současný stav

4.1. Motivace k provedení rešerše

V současné době je možné problém výzkumu proudění páry skrz turbínu/dýzu řešit dvojitým způsobem. První formou je provedení softwarové simulace pomocí matematických modelů. Výhodou této metody je nižší cena oproti provádění experimentů. I přes pokročilé znalosti matematiky a modelace proudění tekutin dochází při výpočtech v některých specifických případech ke značným nepřesnostem. V těchto případech je vhodnější použít experimentální metodu i přes její vyšší finanční, časovou a materiální náročnost.

Mezi hlavní nevýhody provádění experimentu na reálné turbíně/dýze patří nutnost celou měřicí trať fyzicky zkonstruovat, což sebou nese určitý objem finančních prostředků potřebných pro její výstavbu a také nutnost jejího umístění ve vhodné laboratoři. Dalším problémem je systém a metoda vyhodnocení výsledků. Samotné metody měření by neměly příliš ovlivnit výsledky experimentu, a jelikož se jedná o měření nestacionární, klade vysoké nároky na použitou měřicí techniku. Touto problematikou se budu zabývat dále v této diplomové práci.

4.2. Příklady parních vysokorychlostních dýz

4.2.1. Dýza Juliska (původní) - Ústav energetiky FS ČVUT

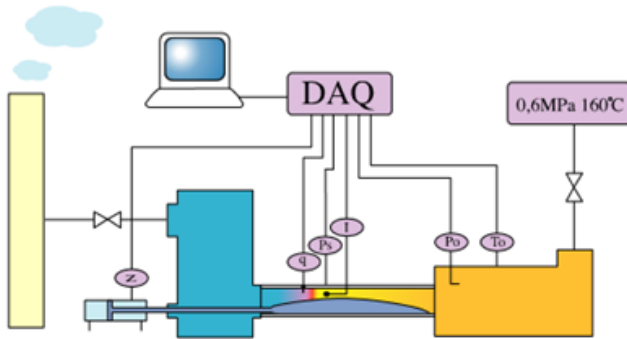
4.2.1.1. Parametry

$$p_{in} = 0,6 \text{ MPa}, T_{in} = 160 \text{ °C}$$

4.2.1.2. Základní popis

Na tomto pracovišti je umístěna Lavalova dýza. Výše uvedené parametry jsou pouze návrhové a jsou odvozeny od technických možností kotelní jednotky. Předpoklad je, že pára proudí do dýzy s parametry mírně vyššími, než je stav nasycení. V rozšiřující se části se objevuje homogenní nukleace vodních kapiček v důsledku přesyčení páry. [1]

4.2.1.3. Schéma



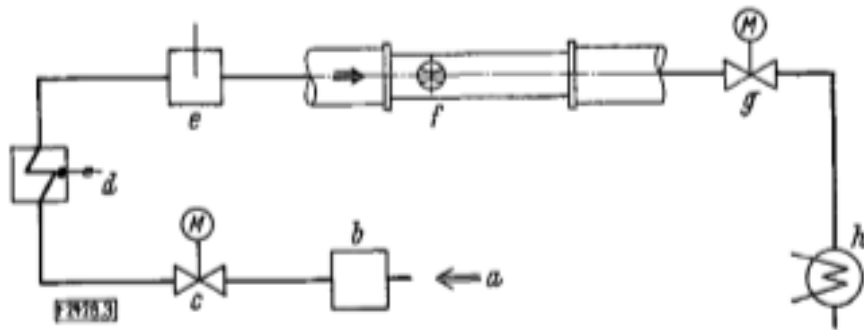
Obrázek 1 - Schéma zapojení měřicí trati dýzy Juliska Zdroj: [1]

4.2.2. Technologický institut v Karlsruhe - Barschdorfova dýza

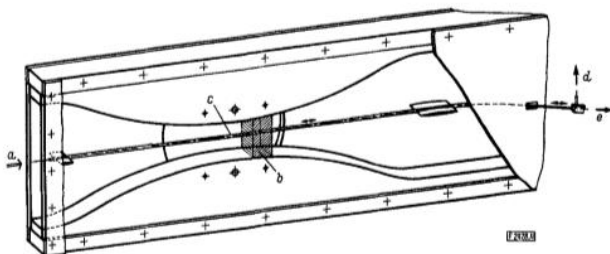
4.2.2.1. Základní popis

Jedná se o klasickou Lavalovu dýzu se zakřivením stěny 584 mm kritickým průřezem 60 mm. [2]

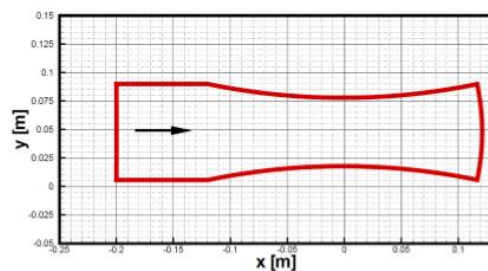
4.2.2.2. Schéma



Obrázek 2 - Schéma měřicí trati Barschdorfovy dýzy Zdroj: [3]



Obrázek 3 - Detail Barschdorfovy dýzy Zdroj: (3)



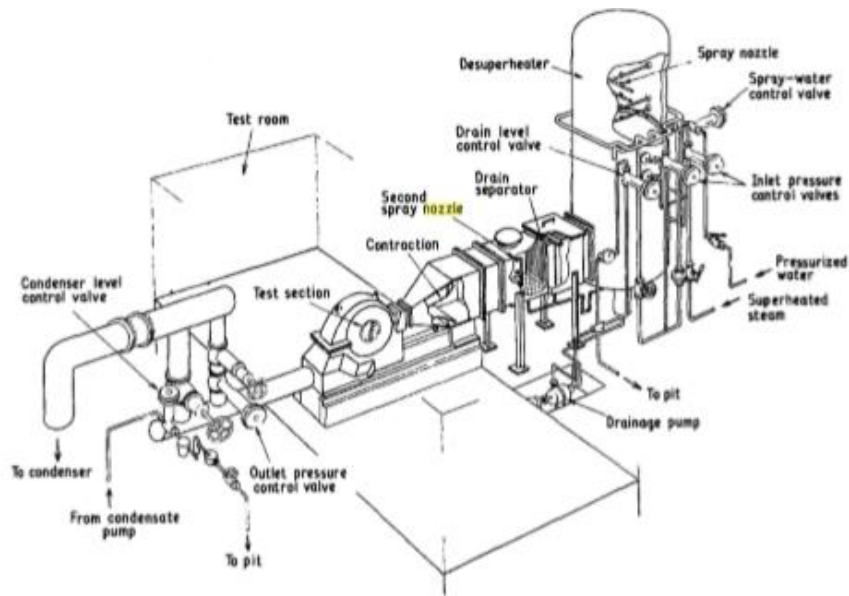
Obrázek 4 - Detail rozměrů Barschdorfovy dýzy Zdroj: [3]

4.2.3. Japonsko, Tokyo Shibauria Electric - T. Ikeda, A. Suzuki dýza

4.2.3.1. Základní popis

Koncepce dýzy vychází ze základního modelu Lavalovy dýzy. Do experimentálního zařízení je přiváděna přehřátá pára z kotle a voda při tlaku 40 bar (absolutní) a teplotě 350 °C. Přehřátá pára vstupuje do chladiče a poté je redukována dvojicí tlakových regulačních ventilů pod 2 bar (absolutní). Pára je zchlazena zástříkem pod teplotu 200 °C. Stlačená a přehřátá pára je vedena do zkušebního úseku přes separátor, který je vybavený pro odebrání velkých vodních kapiček z páry. Je-li pro experiment zapotřebí páry s vyšší vlhkostí, je voda dodána formou vstříku těsně před zkušebním úsekem. Otevření zkušebního úseku má maximální výšku 130 mm a šířku 90 mm. [4]

4.2.3.2. Schéma



Obrázek 5 - Schéma měřící trati T. Ikeda, A. Suzuki dýzy Zdroj: [4]

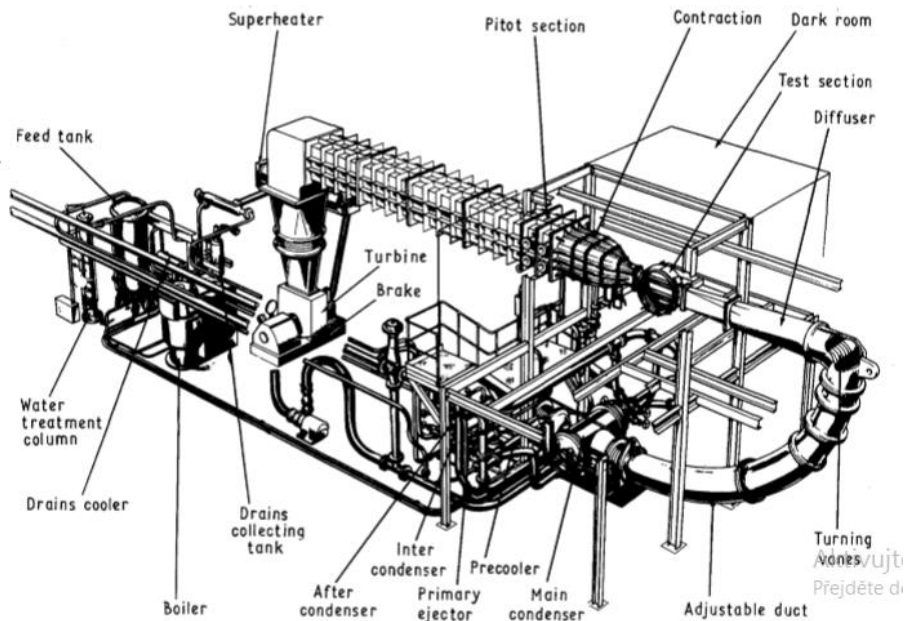
4.2.4. Centra Electricity Research Laboratories, Leatherhead, Surrey - M. J. Moore P. T. Waltera R. I. Crane B. J. Davidson

4.2.4.1. Základní popis

Pokusy byly založeny na sérii Lavalových dýz, které byly namontovány v testovacím úseku. Kondenzace byla podmíněna v dýžích vhodným nastavením vstupního přehřátí nebo vlhkosti. Trysky byly tvořeny horními a dolními vložkami mezi rovnoběžnými bočními stěnami plechu, přičemž vložky byly vyměnitelné, což umožňovalo měnit i parametry dýzy jako takové. Možné dosahované parametry jsou znázorněny na obrázku 7.

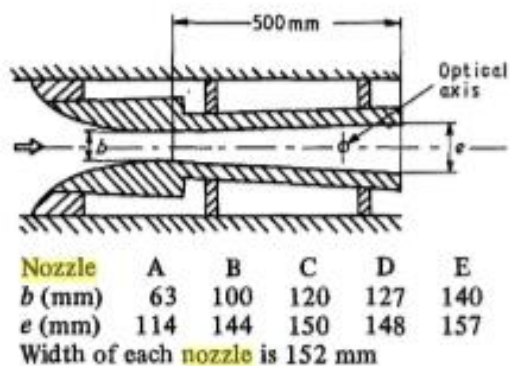
Návrh trysky byl založen na vstupních statických podmínkách suché nasycené páry při tlaku 0,25 bar. Trysky A-E byly vybrány tak, aby poskytovaly postupně klesající rychlost expanze, při daném statickém tlaku. Například při nastavení dýzy, kdy nasycená pára za vstupních podmínek dosahuje rychlosti mach 1,2. Rychlost expanze se pohybuje od 3160 s^{-1} pro tryšku A až 460 s^{-1} pro tryšku E. [4]

4.2.4.2. Schéma



Obrázek 6 - Schéma měřící trati M. J. Moore P. T. Waltera R. I. Crane B. J. Davidson dýzy Zdroj: [4]

Možné dosažené rozměrové parametry dýzy dosažitelné výměnou trysek.



Obrázek 7 - Možné parametry M. J. Moore P. T. Waltera R. I. Crane B. J. Davidson dýzy Zdroj: [4]

4.2.5. Turbomachine R&D Department (TX-2), Brown - Gyarmathy

4.2.5.1. Parametry

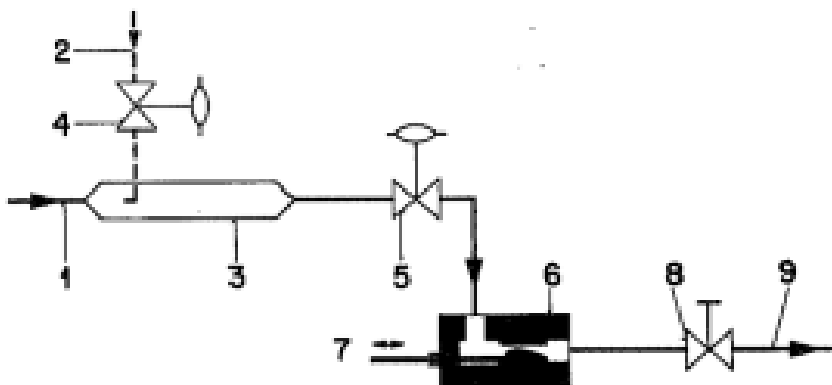
Tabulka 1 - Parametry Gyarmathy dýzy [4]

Pokus č.	Dýza	Stagnační parametry		Kritický tlak
		p_0 (bar)	T_0 (°C)	p^* (bar)
20•A	Nr. 4	40,43	302,18	$10,9 \pm 0,1$
23•C	Nr. 5	100,70	347,55	$39,0 \pm 0,3$

4.2.5.2. Základní popis

Aby se dosáhlo náběhu kondenzace v nadzvukové sekci trysky při tlaku až 50 bar, jsou vyžadovány velmi vysoké vstupní tlaky (do 150 bar). Tyto podmínky byly daleko za schopnostmi laboratorních kotlů a testy musely být prováděny ve velké elektrárně s dostatečně vysokými parametry přiváděné páry. Vyskytly se technické, mechanické a technologické problémy související s teplotní dilatací přesných kovových dílů, jako je profil dýzy a průzory pro optická měření. [4]

4.2.5.3. Schéma



Obrázek 8 - Schéma Gyarmathy dýzy Zdroj: [4]

4.2.6. Technologický institut v Karlsruhe - Schnerrova dýza

4.2.6.1. Parametry

$$P_0 = 0,417 \text{ bar}, T_0 = 357,5 \text{ K}$$

4.2.6.2. Základní popis

Použitá metoda je kombinací analytických a numerických postupů, které jsou založeny na perturbační metodě Bohning & Zierp pro interakci shock/boundary vrstvy v adiabatickém toku.

Homogenní kondenzační proces je popsán klasickou nukleační teorií Volmera společně s Hertzovým a Knudsenovým zákonem o růstu molekulárních kapiček. Rychlost ochlazování, rychlost nukleace, poloměr povrchu kapek a hmotnost frakce kondenzátu jsou analyzovány podél několika proudových linií v hraniční vrstvě. [5]

4.2.6.3. Schéma



Obrázek 9 - Schéma průtoku Schnerrovou dýzou Zdroj: [6]

4.2.7. Doorey dýza/turbína

4.2.7.1. Základní popis

Trvale instalované měřicí přístroje uvnitř turbín jsou často kvůli omezenému přístupu nespolehlivé. Měří se hlavně použitím dlouhých sond o délce až 5 m s typickým průměrem 25 mm, které se vkládají pomocí pevných vodicích trubek. Tyto sondy slouží k měření statického celkového tlaku a také průtoku. Je zapotřebí spolehlivé uspořádání měřícího zařízení, aby se zajistil souvislý odběr páry a její transport mezi hlavou sondy a záznamovým zařízením, protože jakákoliv kondenzace uvnitř odběrové trasy vede k hromadění kondenzátu, což narušuje přenos tlaku. [7]

4.2.7.2. Schéma

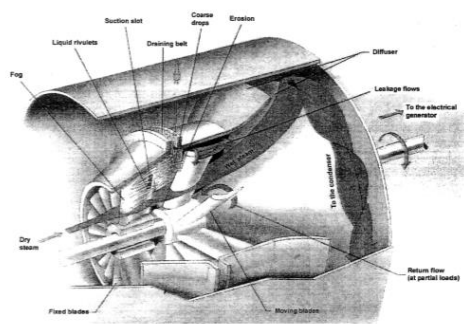
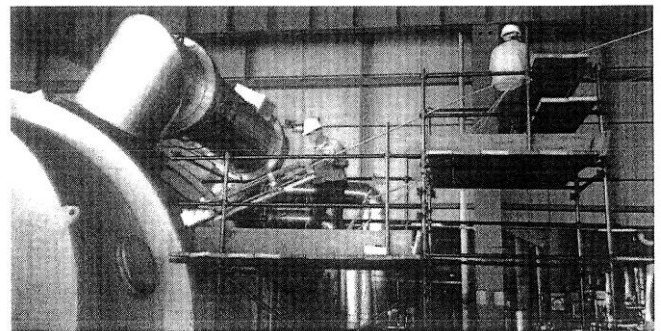
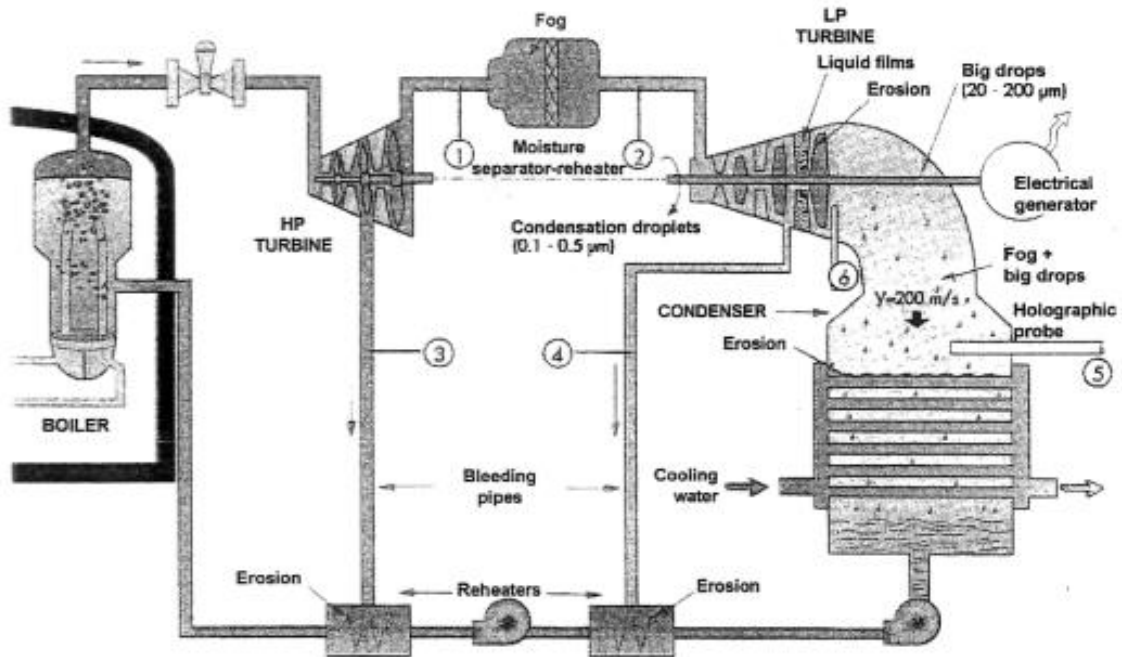


Fig. 1 Wet steam in an LP turbine [1]



Obrázek 10 - Řez turbínou upravenou pro odběry Zdroj: [7]

Obrázek 11 - Způsob odběru páry Zdroj: [7]



Obrázek 12 - Schéma měřící trasy Doorey dýzy + místa odběru Zdroj: [7]

4.2.8. University of Birmingham - Bakhtar dýza/lopatky

4.2.8.1. Parametry

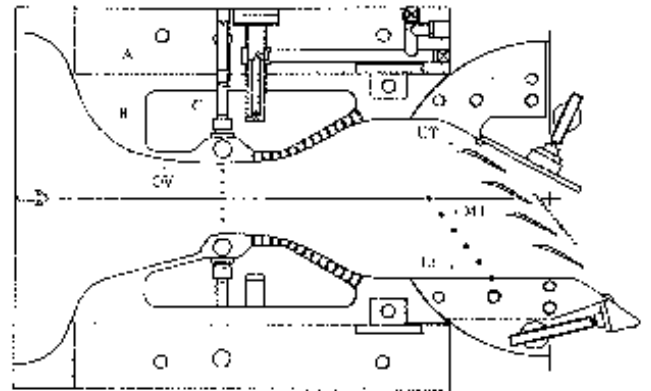
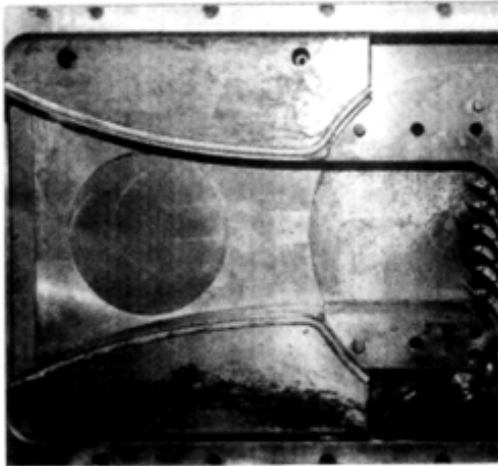
Tabulka 2 - Parametry pokusu Bakhtar Zdroj: [8]

Test	P_{01} (bar)	$T_{01} - T_A$ (P_{01}) (K)	P_{01}/P_{out}	Výstupní podmínky	η (%)
I	1,64	+29	1,63	Subsonic	94,4
2	1,67	+28	2,20	Supersonic	94,2
3	1,73	-9	1,70	Subsonic	87,4
4	1,69	-10	2,01	Supersonic	90,0
5	1,68	-9	1,54	Subsonic	87,3
6	1,75	-8	2,04	Supersonic	90,7

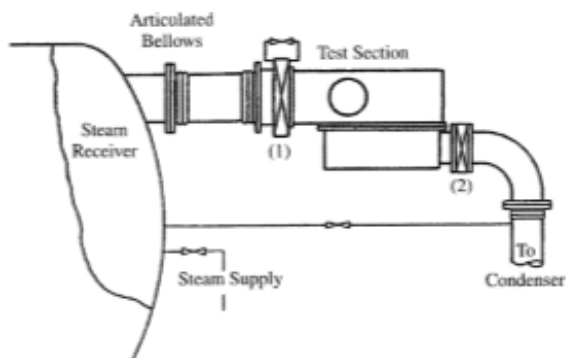
4.2.8.2. Základní popis

Experiment se skládá ze šesti lopatek a dvou poloprofilů obrobených v distančních blocích, které tvoří sedm průchoďů. Centrální tři nože byly namontovány jako samostatná vyměnitelná jednotka. Při měření byly použity dvě jednotky, jedna pro měření tlaku a druhá pro optické vyhodnocení obrazu. [8]

4.2.8.3. Schéma



Obrázek 13 - Schéma + foto dýzové sekce Bakhtar Zdroj: [8]



(a) Superheated



(b) Nucleating

Obrázek 14 - Schéma měřicí trati Bakhtar dýzy Zdroj: [8]

Obrázek 15 - Obrázky reálného experimentu Zdroj: [8]

4.2.9. Gas turbine test cell - Evans, Dawes, Zhang

4.2.9.1. Parametry

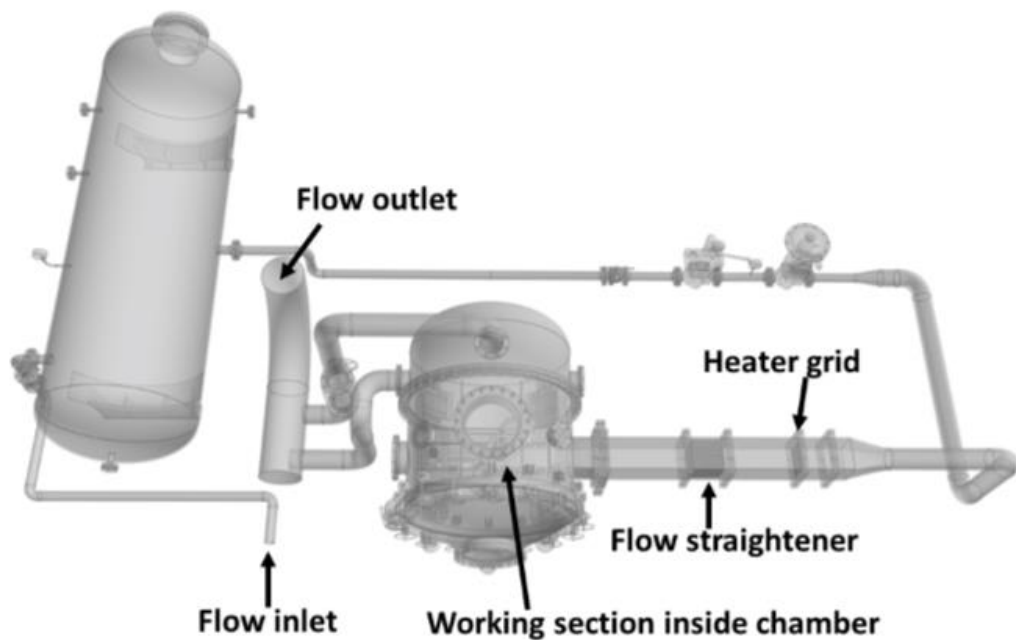
Tabulka 3 - Parametry pokusu Evans, Dawes, Zhang Zdroj: [9]

vstupní/výstupní Machovo číslo	0.45/1.18
vstupní/výstupní úhel proudu tekutiny	-46°/+67°
Re/10 ⁶	2,7

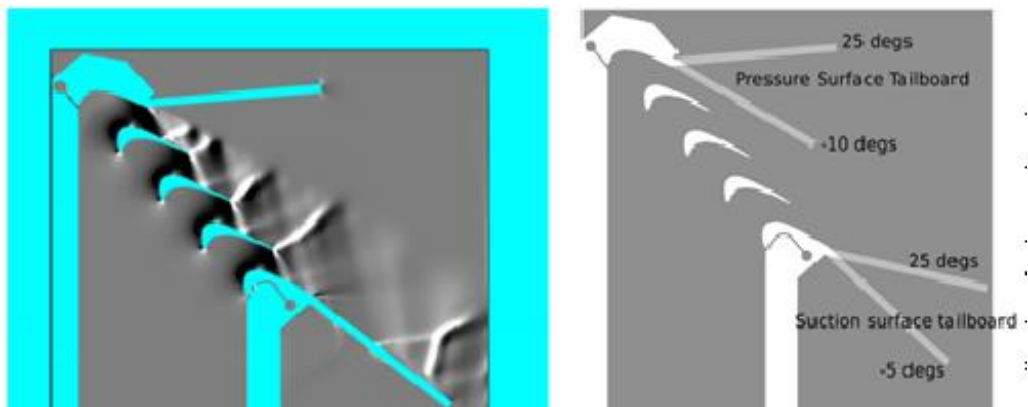
4.2.9.2. Základní popis

Jedná se o experiment pomocí CFD simulace, kde je zvláště kladen důraz na zkoumání vlivu jevu tzv. „tailroads¹“ za hranou dýzy. Během experimentu byly měněny podmínky proudění i nastavení úhlů jednotlivých částí dýzy tak, aby bylo možné sledovat proměnlivé chování proudění. [9]

4.2.9.3. Schéma



Obrázek 16 - Schéma trati pro výpočet pomocí CFD Zdroj: [9]



Obrázek 17 - Detail proudění skrz Evans, Dawes, Zhang dýzu Zdroj: [9]

¹ Segmenty usměrňující tok média za hranou dýzy. Slouží k úpravě statického tlaku a omezení vlivu efektu mezní vrstvy

4.2.10. Wet steam turbine cascade facility- Jacob Andrew McFarland

4.2.10.1. Parametry

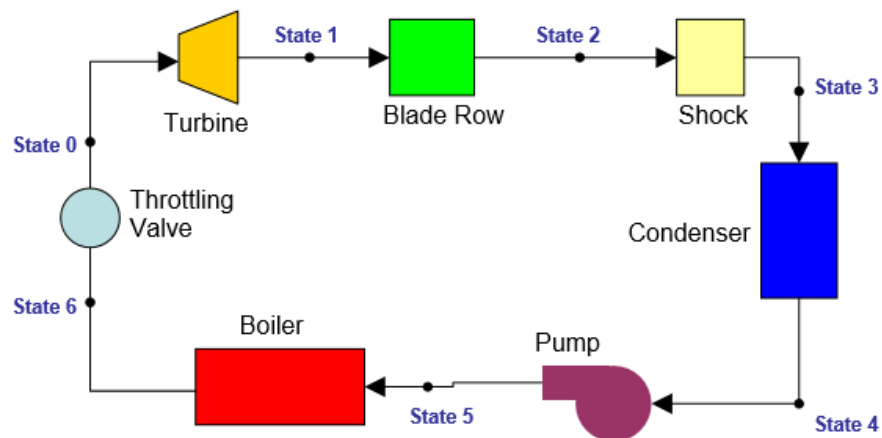
Tabulka 4 - Parametry pokusu Wet steam turbine cascade facility Zdroj: [10]

Vstup	Rychlost (mach)	0,95
	Vlhkost	4 %
	Úhel	82°
Výstup	Rychlost (mach)	2
	Úhel	72°
	P_{01}/P_{out}	8
	Rozteč	8"

4.2.10.2. Základní popis

Zkušební částí je oblast vybavená mechanismem pro změnu nastavení parametrů (náklonu) lopatek dýzové části. Toto rozložení minimalizuje nutnost měnit zkušební část jako celek. Pro změnu rozložení lopatek dýzy lze boční díly zkušebního úseku odejmout a nahradit novými specifickými pro nové zadání. Výstupní rychlost expanze může být řízena změnou úhlu náklonu elementů dýzy. Pokud se mění dramaticky parametry experimentu, může být zkušební část odstraněna a nahrazena jinou částí navrženou pro novou geometrii lopatek. Zkušební úsek byl navržen s nerezovými stěnami o síle 1 palce, aby se snížily vibrace. Všechny vnitřní komponenty byly zhotoveny z nerezové oceli, aby se minimalizovalo riziko zavádění heterogenních částic do proudění např. oxidů železa. [10]

4.2.10.3. Schéma

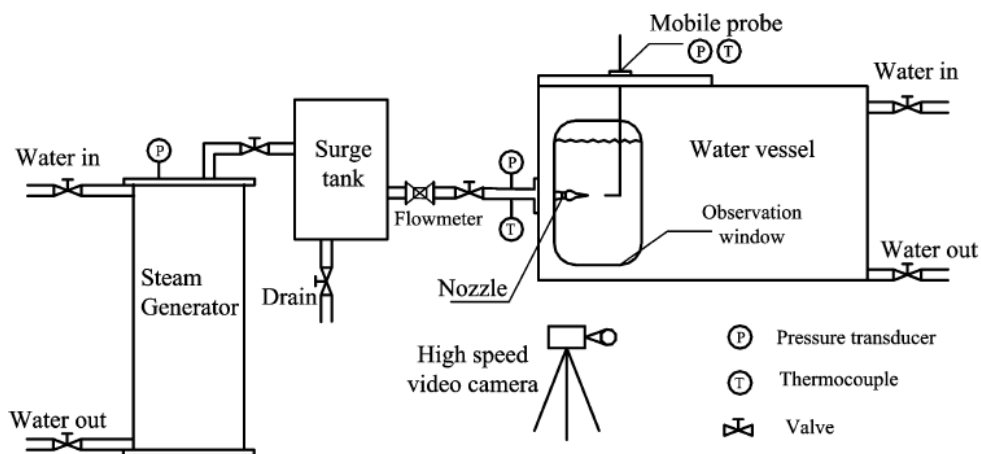


Obrázek 18 - Schéma měřící trati Wet Steam Turbine Cascade Facility – Jacob Andrew Zdroj: [10]

4.3. Další experimenty na dýzách

V této části chci poukázat na to, že lze provádět experimenty na dýzách nejen s použitím standardních medií, jako jsou stačený vzduch a přehřátá pára. Dále poukázat na to, že lze na dýze expandovat i do jiného prostředí, než jsou atmosférické podmínky.

4.3.1. Experiment s expanzí do vodní lázně



Obrázek 19 - Schéma experimentu s expanzí do vodní lázně Zdroj: [11]

Fenomén kondenzace páry v přímém kontaktu s vodou byl rozsáhle zkoumán kvůli jeho významu v mnoha průmyslových operacích, jako je podvodní pohonný systém, přímý kontaktní výměník tepla, mísící zařízení pro chemické účely, vstřikovač poháněný parním proudem a bezpečnostní systém jaderného reaktoru. Pára byla vstřikována do klidové chlazené vody a dle specifických tepelných a hydraulických podmínek bylo objeveno několik režimů kondenzace. [12]

4.4. Shrnutí současného stavu

Na základě výše provedené rešerše v oblasti výzkumu proudění a expanze přehřáté na dýzách jsem zjistil, že tento problém je řešen dvěma způsoby. Formou matematických simulací či experimentálně. Při experimentálním přístupu je kladen důraz zejména na možnost měnit parametry zařízení, a to buď úpravou/výměnou geometrických a rozměrových parametrů dýzové sekce, nebo výměnou celé sekce a její snadné nahrazení sekcí s jinými parametry.

Během rešerše se mi podařilo identifikovat podmínky, které mohou mít vliv na průběh nukleace kapiček v proudu páry, nebo na atomizaci vodního filmu. Mezi ně patří změna vstupních parametrů páry

či tlakového vzduchu, změna geometrie dýzy, změna parametrů proudícího media, změna chemických vlastností vody a změna podmínek, do kterých dýza expanduje.

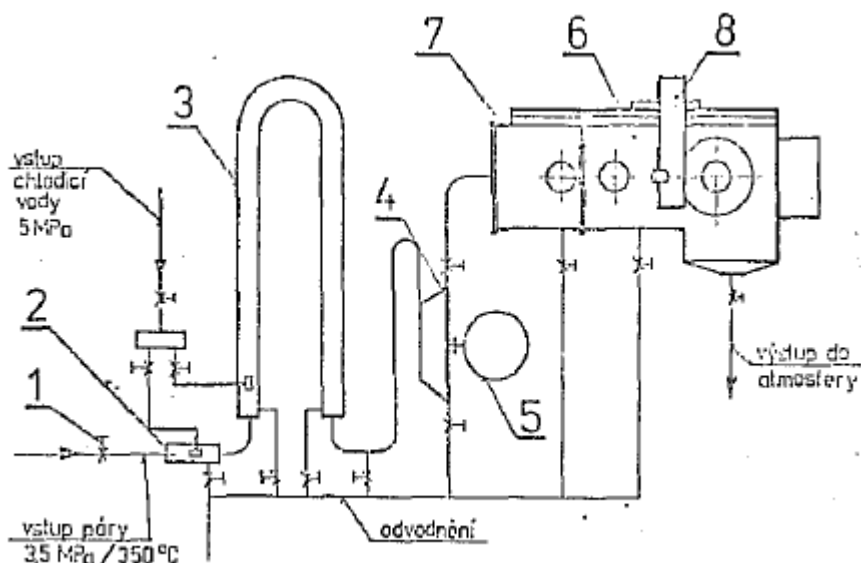
Při žádném z experimentů uvedených v rešerši nebyla zvažena možnost externí injektáže vodní kapičky do proudu páry. Z tohoto důvodu bylo překročeno k rozhodnutí zkonstruovat vlastní měřící trať, která by tuto funkci umožňovala. Na této trati bude možné ověřit měřící aparaturu pro záchyt, rozpoznání a analýzu kapek v proudu páry nebo vzduchu. Díky externí injektáži kapičky bude možné přesně předpovědět moment, kdy se kapička bude vyskytovat v proudu páry. Dále budu schopen částečně predikovat její rozměry a budoucí trajektorii, čímž bude výrazně usnadněna kalibrace přístrojů. Při konstrukci dýzy využiju znalost předpokládaného chování vodní disperze v proudu tekutého media. Tyto předpoklady jsem vystavěl na základě experimentů SVUSS, které jsou uvedeny v kapitole 4.

5. Experimenty SVUSS - Nukleace vodního filmu

Intenzivní rozvoj společnosti a její nároky na spotřebu energie vede výrobce parních turbín ke stavbě jednotek velkých výkonů. Oběžné lopatky posledního stupně nízkotlakého dílu dosahují obvodové rychlosti až 600 m/s a v perspektivních plánech se předpokládají rychlosti ještě větší. Takto vysoká obvodová rychlost u lopatkových stupňů pracujících v oblasti mokré páry může způsobovat erozi oběžných lopatek. U turbín, které pracují ve spojení s lehkými vodními reaktory, se nepříznivé projevy přítomnosti kapalných fází v proudící mokré páře promítají i do vysokotlaké části těchto zařízení. Kapalná fáze obsažená v proudící mokré páře snižuje životnost lopatkových stupňů a zároveň snižuje účinnost přeměny energie obsažené v proudící páře na užitečnou práci. Proto výrobci turbín věnují značnou pozornost otázkám proudění mokré páry v průtočné části parních turbín. [13]

5.1. Měřicí trať pro experimenty SVUSS

Pro experimenty na SVUSS byla sestavena měřicí trať, viz obrázek 20, na které byly zkoumány vztahy mezi relativní rychlostí kapičky a proudem tekutiny a sloužila k popisu mechanismu atomizace. Pro vyšetřování rozměrů kapek vznikajících při procesu spontánní kondenzace byl použit přístroj založený na principu zeslabení monochromatického světelného svazku procházejícího vrstvou mokré páry. [13]



Obrázek 20 - Schéma měřicí trati pro experimenty SVUSS Zdroj: [13]

5.2. Separace kapaln  fáze na obt kan  povrchy

Separace kapaln  fáze na obt kan  povrchy vznikající při procesu spont nn  kondenzace je jedním ze závažných pochod , kter  v kone n  f zi určuje, jak  množství kapaln  fáze s hrubou dispersí, vznikl  rozpadem kapalinových filmů na obtokových hran ch lopatek, dopadne na ob e n  lopatky a bude vyvolávat erozi.

Jedním z hlavních parametrů, kter  se vyskytuje ve vztazích popisujících rychlost eroze, je struktura kapaln  fáze s hrubou dispersí vznikající rozpadem kapalinových filmů na odtokových hran ch obtékaných povrchů, jako např. na rozváděcích lopatkách, omezujících stěnách a podobn .

Stanoven  spektra kapek vychází z předpokladu, že je z visl  nejen na fyzikálních vlastnostech kapaliny a okolního prostředí, ale také na okamžitých hodnotách relativních rychlostí mezi proudící tekutinou a kapalnou fází. Můžeme předpokládat, že na rozměr kapičky vznikající při rozpadu kapaln  fáze působí následující veličiny: relativn  rychlost, vazkost, měrná hmotnost kapaln  fáze a proudící tekutiny.

Z těchto hodnot se dá sestavit bezrozm rn  kritérium tzv. Weberovo  islo, kter  charakterizuje vztah mezi dynamick m tlakem okolního proudu a tlakem vznikajícím z povrchového napětí kapaln  fáze.

[13]

Weberovo  islo:

$$W_e = \frac{W_r^2 * \rho * D}{\sigma}$$

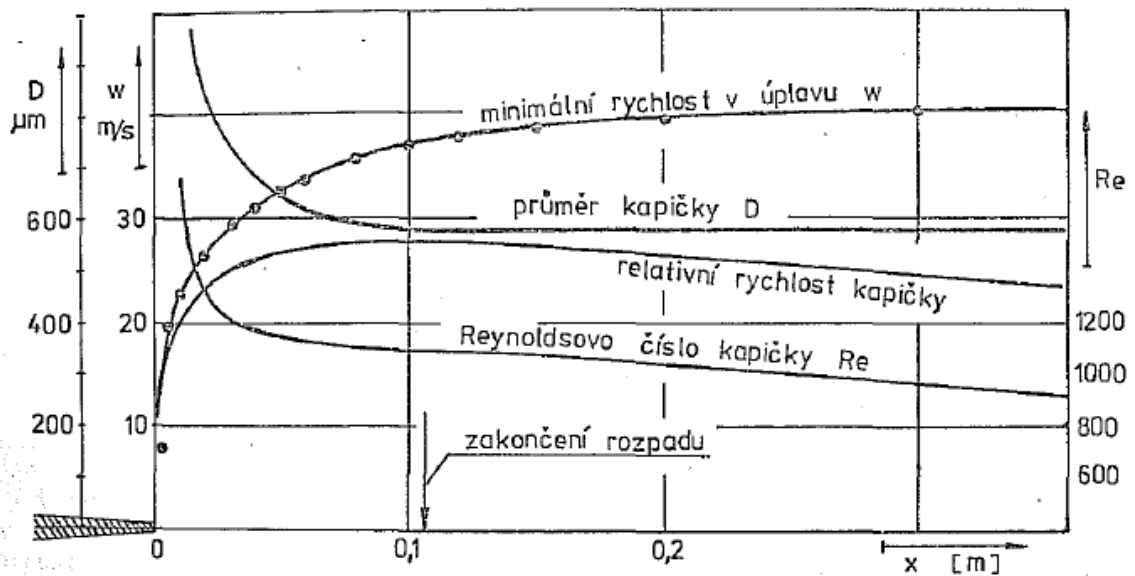
Kde:

σ [N/m] - povrchov  napětí

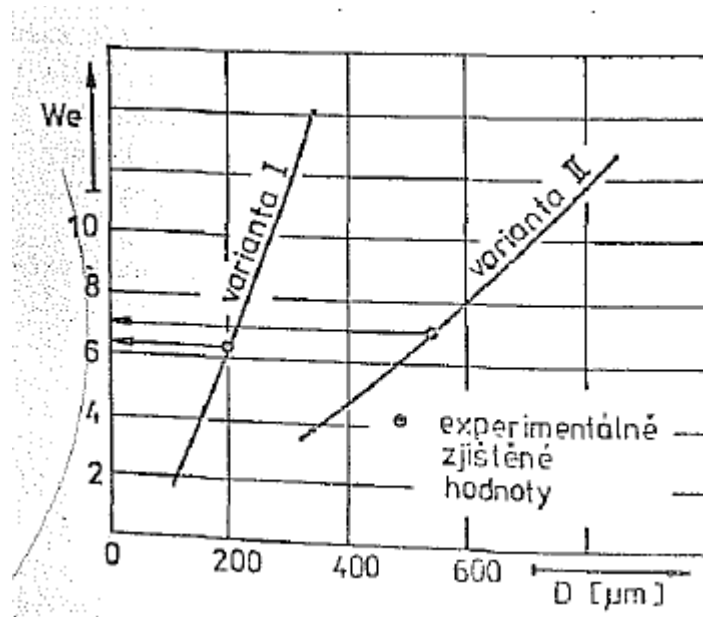
ρ [kg/m³] - hustota směsi

D [μ m] - průměr kapičky

W_r [m/s] - relativn  rychlost, kter  se spo t  jako rozdíl rychlosti plynu a kapičky

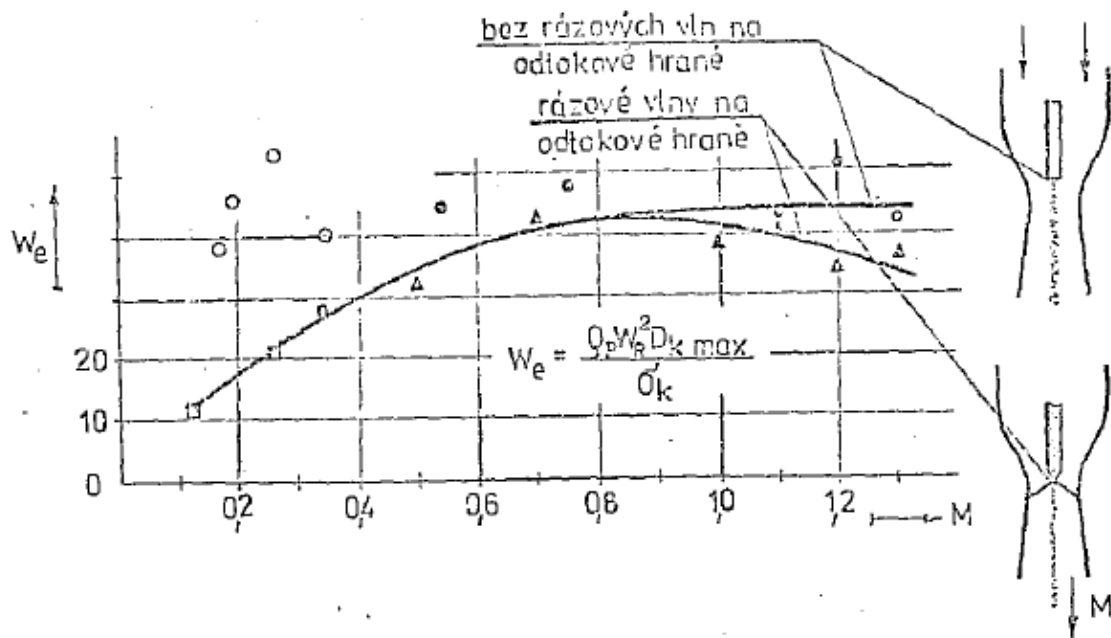


Obrázek 21 - Rozložení rychlosti v úplavu za obtákaným symetrickým profilem pro $We=6$ Zdroj: [13]



Obrázek 22 - Závislost Weberova čísla na stabilním rozměru kapky I-40m/s, II-80m/s Zdroj: [13]

Nejdůležitější informací, kterou jsem si z toho experimentu vyvodil pro další pokračování, je kombinace poznatků znázorněných na obrázku 22 a obrázku 23. Tyto závislosti mi v praktické části poslouží jako základní předpoklad chování atomizace kapek. Prvotní parametry mých experimentů budu kalibrovat na zachycení kapek těchto rozměrů.



Obrázek 23 - Weberovo číslo stanovená v závislosti na rychlosti okolního proudu Zdroj: [13]

5.2.1. Závěry z experimentu SVUSS

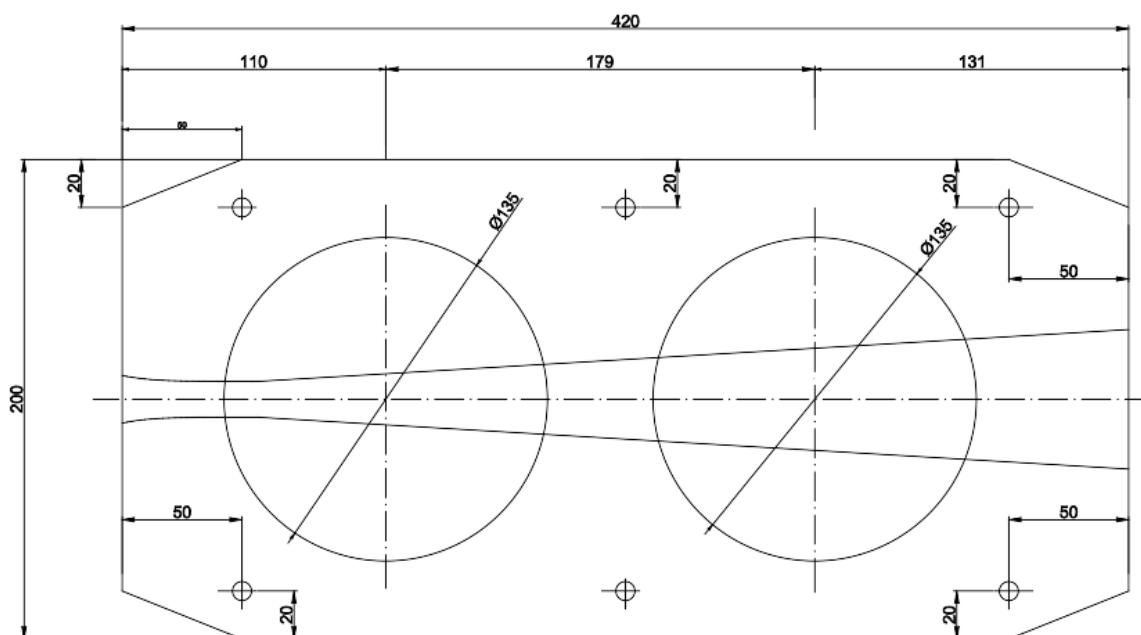
Z kapitoly 4. je patrné, že výskyt kapiček v NT dílu turbíny je nežádoucí jev, kterému výrobci turbín věnují pozornost. Tento fakt je sám o sobě motivací k sepsání této práce. Závislosti z experimentů SVUSS mi slouží jako vzor a jsou základním předpokladem pro experimenty popsané v praktické části této práce. Předpoklady chování kapiček dle závěrů výzkumu SVUSS budu ověřovat za pomoci moderní techniky jako je Mayvern Spraytec a vysokorychlostní snímání kamerou.

6. Konstrukce experimentální trati - Juliska

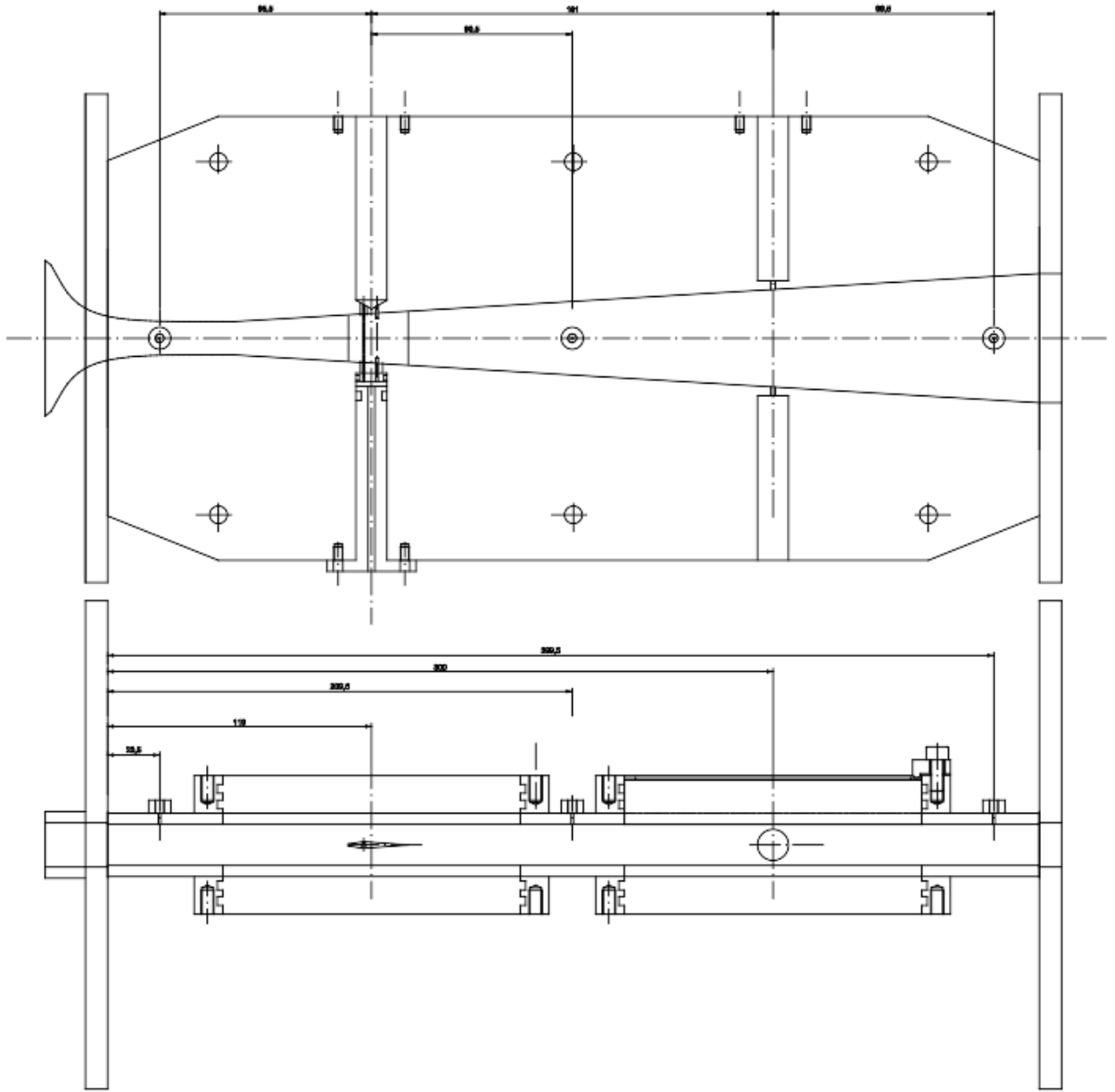
Vlastní konstrukce experimentální trati je jedním z hlavních přínosů této diplomové práce. Celá konstrukce probíhala ve spolupráci s vedoucím diplomové práce a s technickými pracovníky Ústavu energetiky FS ČVUT. V průběhu výroby jednotlivých dílů měřicí trati jsem prováděl dílčí experimenty s fotogrammetrickou metodou, které budou detailně popsány v kapitole 7.

6.1. Požadované parametry - zadání

Dýza byla zkonstruována, dle již existujícího návrhu Ing. Ondřeje Bartoše, Ph.D. na základě jeho zkušeností s předchozími experimenty a na základě rešeršní části této práce. Jako základ byla zvolena Lavalova dýza se šířkou kanálu 18,5 mm a výškou kanálu v kritickém místě 15 mm. Pro injektáž vody byl zvolen profil NACA 0008, který byl umístěn 136 mm od začátku dýzy a má délku 37,5 mm.



Obrázek 24 - Dýza základní parametry - náčrt



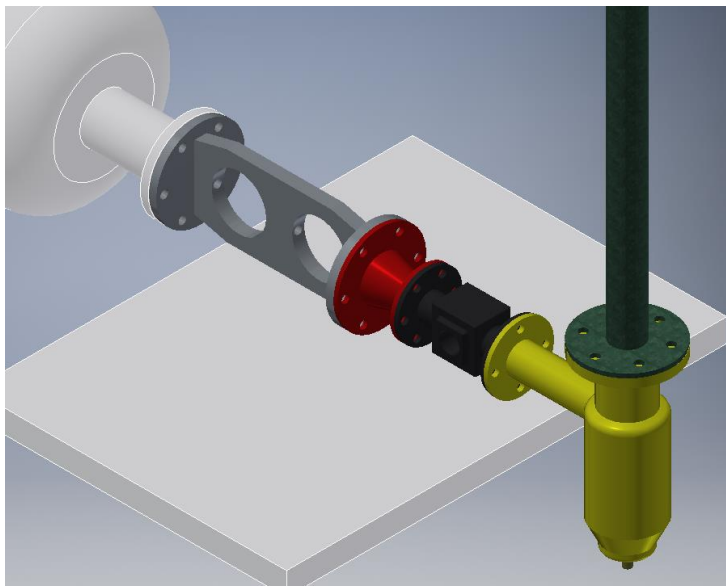
Obrázek 25 - Dýza umístění otvorů pro měřicí instrumentaci



Obrázek 26 - Profil NACA 0008 Zdroj: [14]

6.2. Vlastní návrh měřicí trati

Dle výše uvedeného návrhu byla zkonstruována dýza. Aby bylo možné provádět na dýze experimenty, musel jsem v rámci této diplomové práce zkonstruovat další potřebné komponenty, které dohromady s dýzou tvoří měřicí trať. Po kompletaci trati jsem provedl návrh a montáž měřicí aparatury.

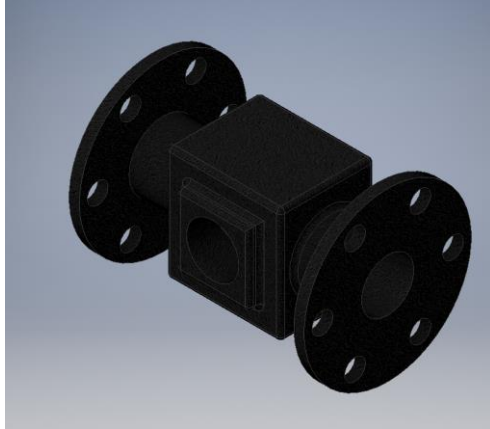


Obrázek 27 - Detail hlavních dílů měřicí trati

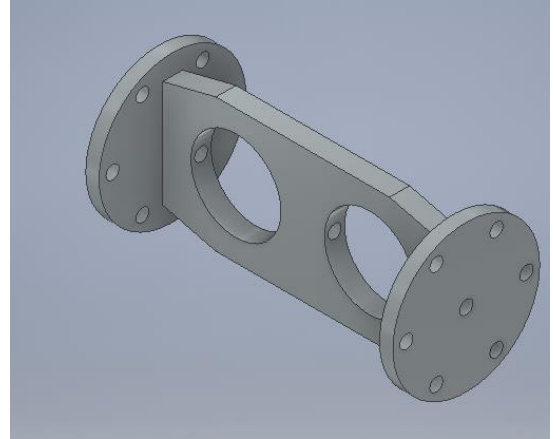
6.2.1. Návrh měřicí trati

Základním prvkem celé trati je dýza. Celý návrh měřicí trati tudíž vychází z parametrů dýzy. Výrazným omezením pro konstrukci trati bylo prostorové omezení v laboratoři. Celá měřicí trať se musela vejít do předem určeného prostoru, který je z jedné strany ohraničen stěnou, z druhé strany úložnými prostory pro další experimenty a ze shora potrubním řádem a servisním můstkem. Konstrukce trati byla řešena s ohledem na připojení na stávající rozvody páry a vysokotlakého vzduchu.

Při konstrukci měřicí trati jsem vycházel z konstrukce již dříve sestavené dýzy a ustalovací nádrže. Použil jsem jejich připojovací rozměry jako výchozí a referenční. Dále jsem použil již dříve zakoupené průhledítko pro sledování proudění páry/kondenzátu v potrubí za dýzou.

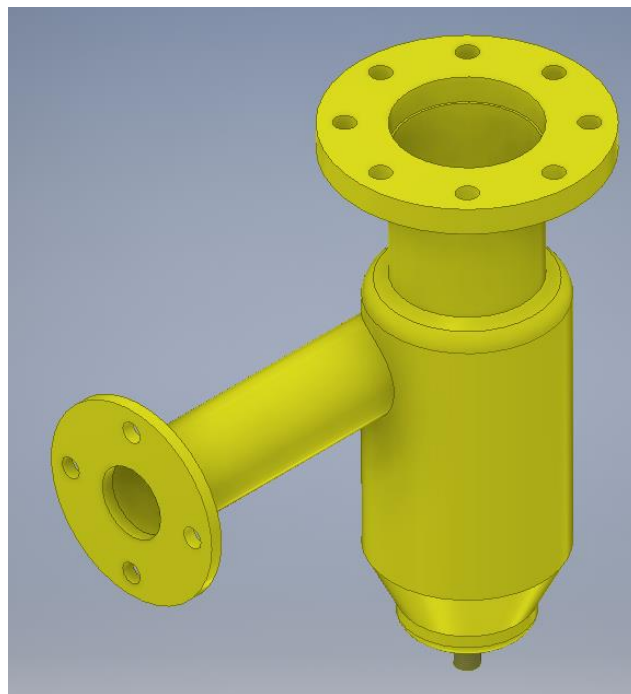


Obrázek 28 - Průhledítko (kupované)



Obrázek 29 - Dýza

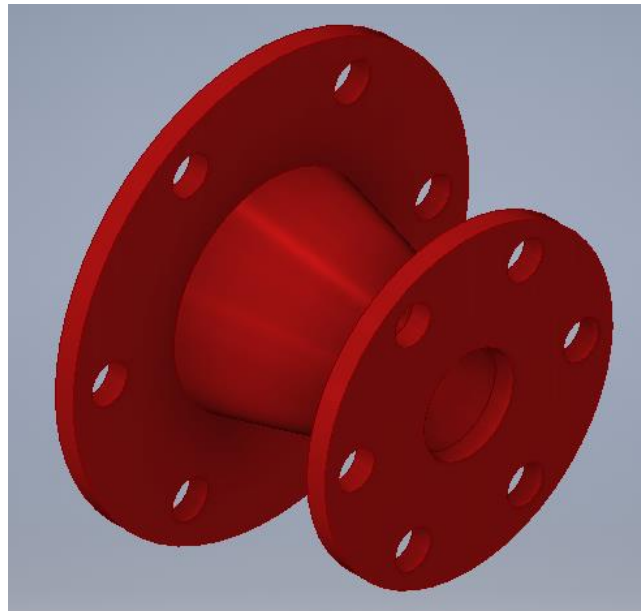
První komponenta trati, kterou jsem navrhoval, byl separátor kondenzátu z proudu media. Pro tento účel jsem zvolil konstrukci jednoduchého cyklonu s tangenciálním vstupem media, výstupem na vrchní části a odkalovacím ventilem na spodní kuželovité části. Odpouštění kondenzátu v tomto návrhu není automatizované a probíhá po manuálním otevření ventilu.



Obrázek 30 - Cyklonový separátor

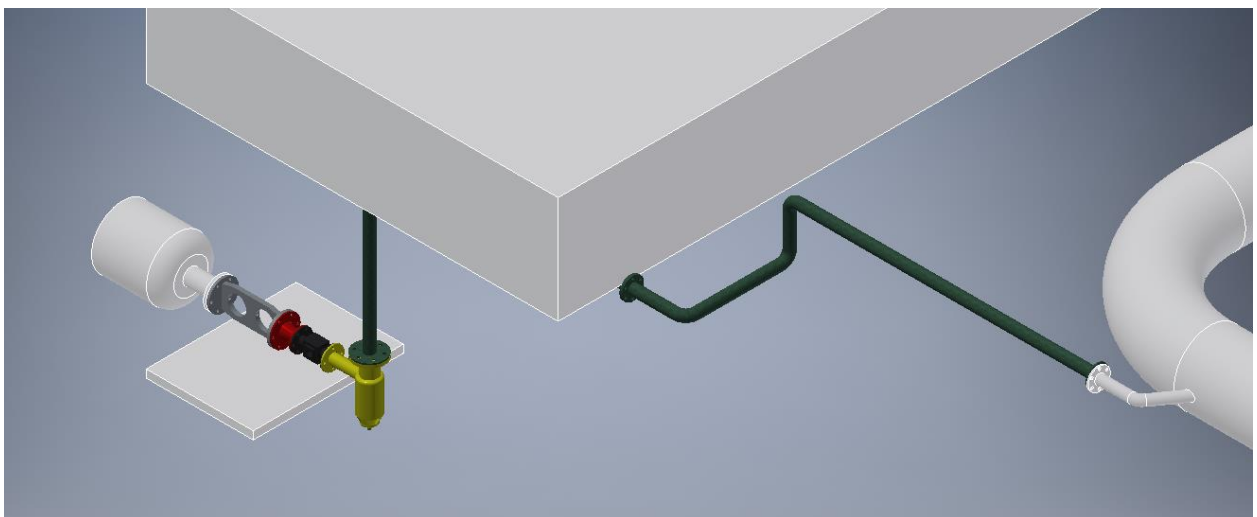
Další navrhovaná komponenta byla redukce průměru potrubí, která slouží jako plynulý přechod z výstupu dýzy a vstupu do průhledítka. Ke konstrukci této komponenty jsem použil část kuželovitého

potrubí s délkou 100 mm a vnějším průměrem 108 mm na jedné straně a 58 mm na straně druhé, ke kterému byli přivařeny příruby požadovaných rozměrů.



Obrázek 31 - Redukce

V poslední řadě bylo nutno navrhnout výfukové potrubí, které spojuje výstup ze separátoru a hlavní odpadní potrubí na páru, které protíná celou laboratoř na Julisce. Při konstrukci tohoto potrubí byly zaměřeny hlavní rozměry, avšak konečné rozložení bylo upraveno na místě při kompletaci celé měřicí trati.



Obrázek 32 - Rozložení měřicí trati vč. výfukového potrubí

Jednotlivé komponenty celé měřicí trati byly upravovány na míru přímo v místě laboratoře na Julisce. Při konstrukci se vycházelo z dostupných standardních dílů z důvodu úspory finančních nákladů na výstavbu.

6.2.2. Návrh a rozložení měřící instrumentace

Aby bylo možné provádět na trati měření, musela být trať vybavena měřícím zařízením. Vzhledem k povaze experimentu je pro vyhodnocení experimentů nejdůležitější měřit veličiny jako je tlak, teplota a sbírat fotogrammetrická data z průchodu kapiček dýzou. Pro sběr optických dat je využíváno PC s kompatibilním SW LuCam Capture. Teplota a tlak jsou sbírány kontinuálně. Za tímto účelem byla použita specializovaná jednotka pro sběr experimentálních dat National instruments SCXI 1000.

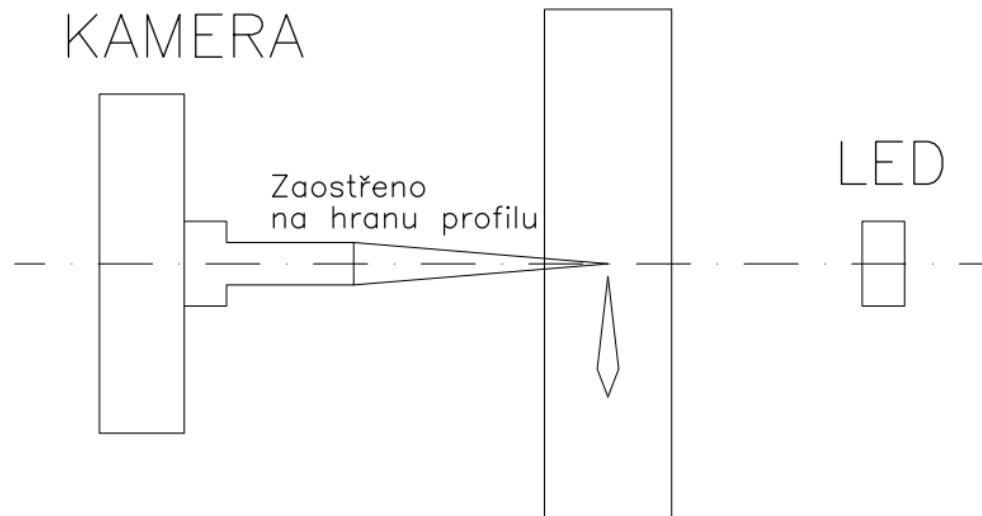


Obrázek 33 - National instruments SCXI 1000 v prostorách laboratoře Juliska

6.2.2.1. Fotogrammetrické měření

Pro měření byla použita laboratorní kamera Lumenera 125 x Edmund optics. Kamera pro fotogrammetrické měření je jedním z nejdůležitějších měřících zařízení, které je na trati osazeno. Kalibrace a vyhodnocení dat vyžaduje nejvíce příprav, je nutno synchronizovat čas otevření závěrky kamery a dobu záblesku led diody. Dalším požadavkem je zaostření přesně na střed proudu páry s kapičkami tak, aby kamera poskytovala co nejostřejší fotografie pro pozdější vyhodnocení. Kalibrace je zajištěna tak, že celá sestava kamery a led diody je umístěna na kolejnici a je tudíž jednoduché upravovat

jejich vzájemnou polohu a zároveň zachovat dokonalou souosost. Synchronizace závěrky a záblesku je zabezpečena pomocí triggeru.

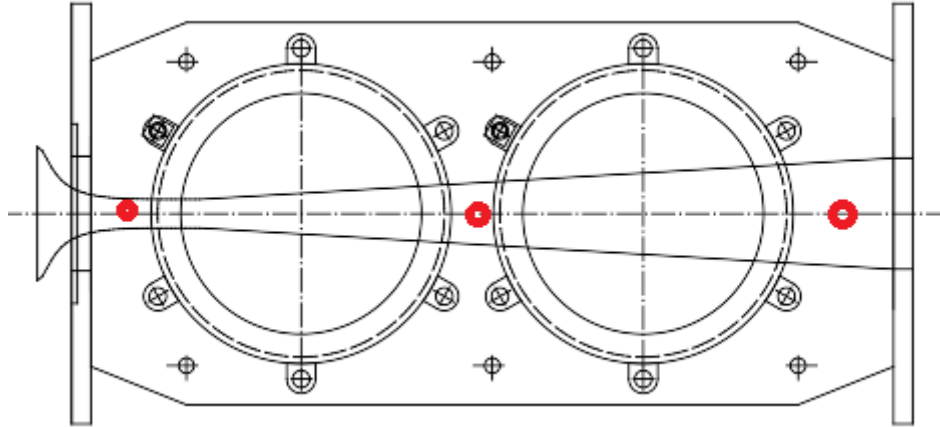


Obrázek 34 - Schéma sestavy (kamera - dýza - LED dioda)

6.2.2.2. Měření tlaku

Měření tlaku je prováděno kontinuálně v průběhu celého měření. Celá trať je vybavena čtyřmi místy pro měření tlaku. Jedno místo se nachází na ustalovací nádrži, kde je měřen statický tlak před vstupem do dýzy. Měření statického tlaku v ustalovací nádrži je odděleno od měření tlaku v dýze, tzn. je prováděno při každém měření a je měřeno pomocí vlastního snímače tlaku.

Tlak media v průběhu dýzy je možné měřit ve třech bodech, viz obrázek 35. Pro měření tlaku na dýze jsem navrhnul dvě varianty možného uspořádání, kterým se detailněji budu věnovat níže. Ze znalosti geometrie a tlaku v konkrétním místě dýzy lze vypočítat charakteristické vlastnosti proudění jako je rychlost v kritickém průřezu.



Obrázek 35 - Dýza s červeně vyznačenými místy pro odběr tlaku

Omega pxm309-3.5a10v [15]



Obrázek 36 - Tlakový snímač Omega PXM309 Zdroj: [15]

Napájení:

Ochrana proti přepólování a ochrana proti přepětí

15 až 30 Vdc při 10 mA

Výstup:

0 až 10 Vdc Výstup: 15 až 30 Vdc při 10 mA

4 až 20 mA: 9 až 30 Vdc

Rozsah:

Statická přesnost 350 mBarů až 700 Barů

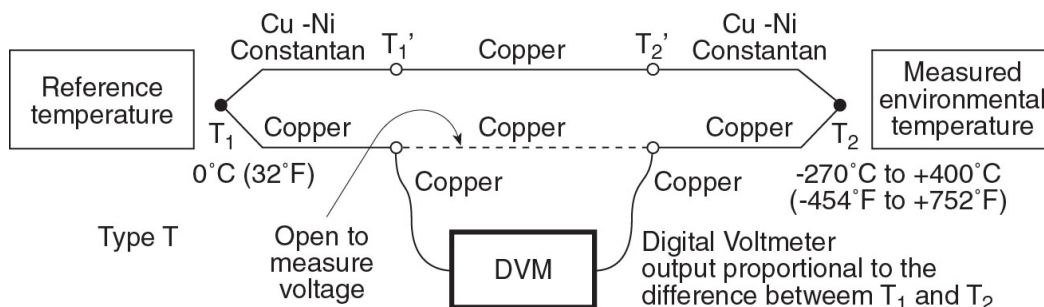
Vstup:

G ¼ samec

6.2.2.3. Měření teploty

Teplota media je měřena pomocí termočlánu typu T a její hodnoty jsou zaznamenávány kontinuálně v průběhu celého měření. Teplota je snímána ve dvou bodech. První měření je na stejné úrovni jako měření statického tlaku v ustalovací nádobě. Druhé měření teploty je možné provádět pomocí jednoho ze dvou univerzálních vstupů, který se nachází na úrovni skleněných průzorů v dýze.

Termočlánek typu T



Obrázek 37 - Schéma termočlánu typu T Zdroj: [16]

Rozsah:

-200 až 400 °C

Výstup:

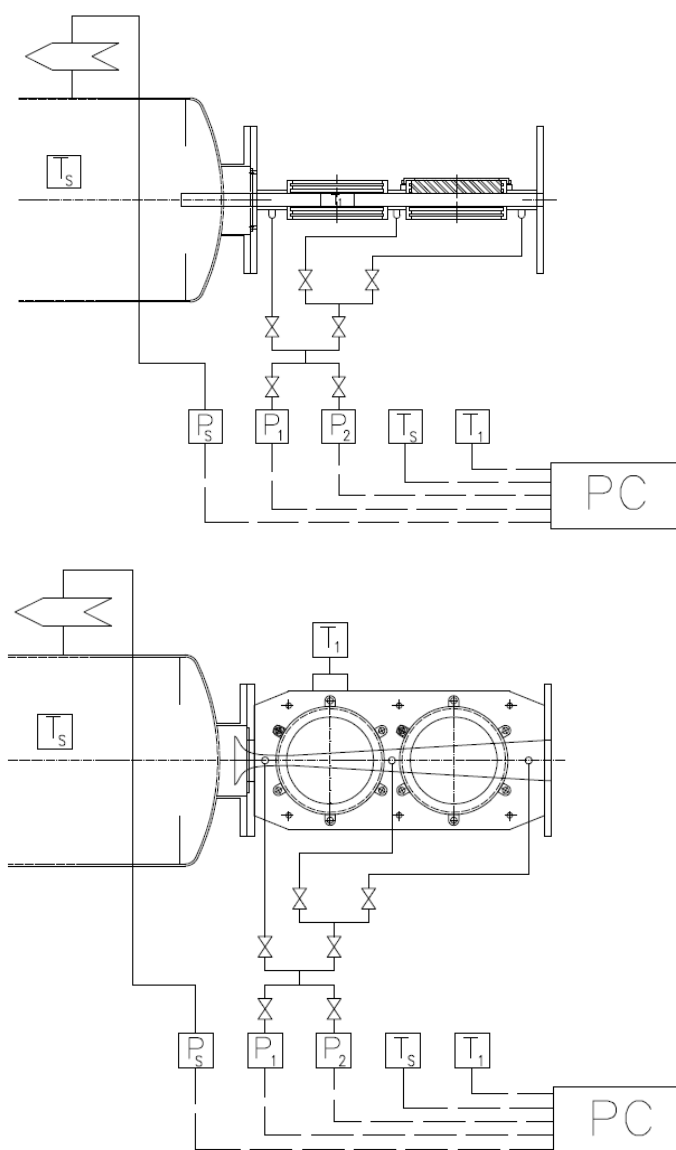
Tabulka 5 - Výstupy termočlánu typu T Zdroj: [16]

	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
-300							-6,258	-6,248	-6,232	-6,209
-250	-6,180	-6,146	-6,105	-6,059	-6,007	-5,950	-5,888	-5,823	-5,753	-5,680
-200	-5,603	-5,523	-5,439	-5,351	-5,261	-5,167	-5,070	-4,969	-4,865	-4,759
-150	-4,648	-4,535	-4,419	-4,300	-4,177	-4,052	-3,923	-3,791	-3,657	-3,519
-100	-3,379	-3,235	-3,089	-2,940	-2,788	-2,633	-2,476	-2,316	-2,153	-1,987
-50	-1,819	-1,648	-1,475	-1,299	-1,121	-0,940	-0,757	-0,571	-0,383	-0,193
0	0,000	0,195	0,391	0,589	0,790	0,992	1,196	1,403	1,612	1,823
50	2,036	2,251	2,468	2,687	2,909	3,132	3,358	3,585	3,814	4,046
100	4,279	4,513	4,750	4,988	5,228	5,470	5,714	5,959	6,206	6,454
150	6,704	6,956	7,209	7,463	7,720	7,977	8,237	8,497	8,759	9,023
200	9,288	9,555	9,822	10,092	10,362	10,634	10,907	11,182	11,458	11,735
250	12,013	12,293	12,574	12,856	13,139	13,423	13,709	13,995	14,283	14,572
300	14,862	15,153	15,445	15,738	16,032	16,327	16,624	16,921	17,219	17,518
350	17,819	18,120	18,422	18,725	19,030	19,335	19,641	19,947	20,255	20,563
400	20,872									

6.2.2.4. Návrh umístění snímačů (složitá varianta)

Tato varianta umístění snímačů počítá s použitím sólového snímače tlaku pro statický tlak v ustalovací nádobě a s použitím dvou snímačů pro měření tlaku na dýze. Snímače tlaku na dýze mají odlišné rozsahy, a proto je díky jejich přepínání možné přesněji určit tlak. Volba místa odběru je prováděna pomocí čtyř ventilů, jejichž otevíráním a zavíráním určíme místo odběru.

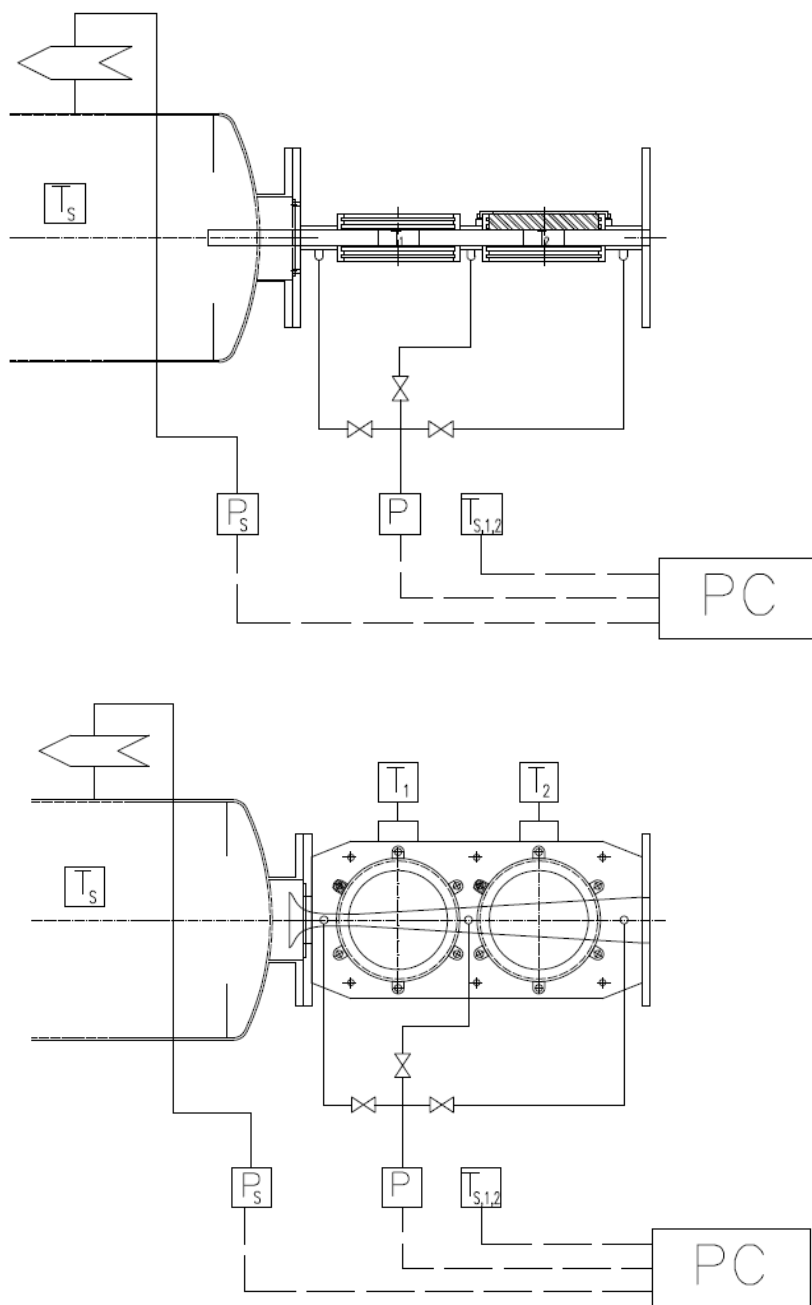
Teplota je zde měřena pomocí dvou termočlánků, z nichž jeden měří teplotu v ustalovací nádrži a druhý v dýze. Výstupy z jednotlivých snímačů jsou svedeny do sběrnice National instruments SCXI 1000, odkud jsou data posílána do PC.



Obrázek 38 - Schéma instrumentace - složitá varianta

6.2.2.5. Návrh umístění snímačů (Jednoduchá varianta)

Jednoduchá varianta rozmístění snímačů počítá s využitím pouze jednoho snímače pro měření tlaku v průběhu dýzy. Tímto rozmístěním značně zjednodušíme konstrukci instrumentace, snížíme tak ekonomické náklady a zamezíme možným chybám, které by mohly vzniknout vlivem lidského faktoru při volbě snímačů ve složitější variantě.



Obrázek 39 - Schéma instrumentace - jednoduchá varianta

6.3. Výsledné provedení

Výsledné provedení měřicí trati respektuje základní návrhy, avšak finální úprava některých dílů probíhala přímo na místě výstavby. Tyto úpravy respektovali zachování plánované funkčnosti měřicí trati, ale jednotlivé komponenty se přizpůsobovali prostorovým možnostem laboratoře na Julisce.

Celková sestava měřicí trati:



Obrázek 40 - Výsledná sestava trati pohled 1



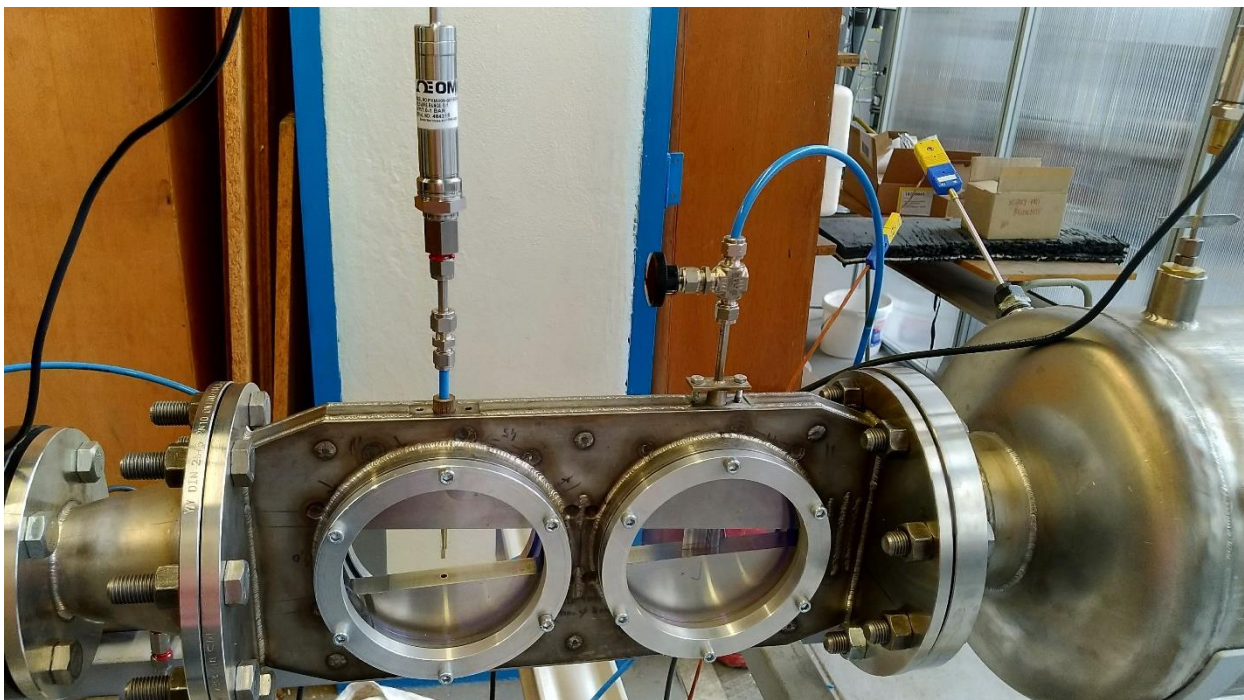
Obrázek 41 - Výsledná sestava trati pohled 2

Detail měření tlaku:



Obrázek 42 - Detail měření tlaku

Detail odběr tlaku:



Obrázek 43 - Detail odběr tlaku

Detail cyklonový separátor vody:



Obrázek 44 - Detail cyklonový separátor vody

Měřicí trať osazená přístrojem Malvern Spraytec:



Obrázek 45 - Měření s přístrojem Malvern Spraytec

Kompresorová stanice – Zdroj stlačeného vzduchu:



Obrázek 46 - Kompresorová stanice - zdroj stlačeného vzduchu

7. Rozměrová analýza

V průběhu výroby částí měřící trati jsem se věnoval současným metodám rozměrové analýzy částic. Základní motivací pro zkoumání metod rozměrové analýzy spočívá v potřebě vyhodnocení velikosti mikrokapiček, které se nachází v proudu páry, který prochází dýzou. Díky této skutečnosti se jako vhodná metoda pro toto použití jeví obrazová analýza. Základní mechanismus pro měření rozměrů kapiček, bude zachycení fotografie letící kapičky v proudu páry pomocí objektivu vysokorychlostního fotoaparátu skrz průhledítko v boku dýzy, následné softwarové zpracování fotografie a vyhodnocení její velikosti.

Výzkum chci zaměřit hlavně na částice v rozměrech řádově desítek mikrometrů. Mezi mé další požadavky na zvolené metody patří jejich použitelnost pro větší množství částic současně, jistá míra „automatizace“ měřící metody a výstup v podobě distribuční funkce.

7.1. Výběr metody měření

Na základě výše uvedených předpokladů jsem se rozhodl výzkum zaměřit na granulometrickou analýzu mletého černého uhlí. Jako referenční metodu jsem zvolil síťovou, která se pro účely granulometrické analýzy uhelného prachu používá již řadu let a lze tak její výsledky považovat za obecně uznávané.

Za metodu „experimentální“ jsem zvolil obrazovou analýzu vzorku uhlí pomocí optického mikroskopu Motic panthera E a softwarového rozhraní Motic. Dále jsem prověřil metodu laserové difrakce s použitím měřícího přístroje Malvern Spraytec, který je hojně využíván pro detekci a rozměrovou analýzu částíček materiálu. Metodu Malvern Spraytec jsem uvedl zejména z důvodu, že ji při následných experimentech na dýze využiji jako metodu pro analýzu distribuční funkce kapiček.

7.2. Granulometrie

Granulometrická analýza určuje základní rozložení velikosti částic v daném vzorku pevné syple látky. Distribuční křivka, která popisuje procentuální rozložení velikosti jednotlivých frakcí, je jednou ze základních metrik, díky které můžeme stanovit základní vlastnosti materiálu.

Základní metodou granulometrické analýzy je síťová analýza. Tato metoda je relativně nenáročná na instrumenty, avšak je zdlouhavá a vyžaduje zkušenou obsluhu, která minimalizuje systematickou lidskou chybu.

Během několika posledních let byly vyvinuty moderní metody, které napomáhají k přesnější analýze vzorku. Mezi tyto nové metody řadíme: metodu laserové difrakce, metodu počítání částic pomocí elektrického odporu a optickou metodu užívající pokročilou obrazovou analýzu. [17] Tyto nové metody mají hlavní výhody zejména díky rychlosti vyhodnocení výsledku, ale také přesnosti naměřených hodnot a minimalizaci faktoru lidské chyby. Hlavní nevýhodou nových metod je prozatím stále vysoká cena měřících přístrojů.

Další používanou metodou je metoda sedimentace, která nevyžaduje technickou vyspělost přístrojů ani rychlostí analýzy. Tato metoda je vhodná pro separaci velmi jemných vzorků.

Při výběru metody pro granulometrickou analýzu je nutné zohlednit předpokládanou velikost částic ve vzorku. Některé z výše popisovaných metod mají fyzikální omezení, které je předurčují k použití pouze pro omezené rozmezí velikosti částic.

7.3. Jednotlivé metody granulometrie

7.3.1. Sítová metoda

Určení granulometrického složení spočívá v rozdělení zkoušeného materiálu podle velikosti částic pomocí sít o normalizovaných parametrech. K sítovému rozboru se použije sada drátěných sít podle ČSN ISO 2395. Při stanovení zrnitosti za sucha se postupuje podle normy ČSN ISO 2591-1, při kterém se používají zkušební síta z kovové tkaniny a děrovaného plechu a speciální přístroj pro střásání vzorku. [18] Cílem této zkoušky je stanovit hmotnost vzorku na každém ze sít označených velikostí ok. Dále se provádí analýza výsledků.

Síta jsou tvořena oky s identickým rozměrem mezery, které zaručují, že sítem projde částice s poloměrem maximálně o velikosti poloviny rozměru oka. Jev, který negativně ovlivňuje výsledky při sítové analýze je nestejnorodý a nesférický tvar částic. Díky tomuto jevu musíme brát v úvahu to, že sítem projdou nejen částice se všemi rozměry menšími, než je oko síta, ale i částice, které jsou podélné a mají jeden rozměr výrazně menší než ostatní a díky tomuto rozměru projdou sítem. Projevem je mírné posunutí křivky naměřené distribuční funkce oproti jejímu reálnému průběhu. [19]

Velkou nevýhodou sítové metody je vysoké riziko chyby způsobené lidským faktorem (úlet jemných frakcí při přesunu ze síta na vážení) a dlouhá doba potřebná na střásání materiálu (vyšší desítky minut).

7.3.1.1. Křivka rozsevu

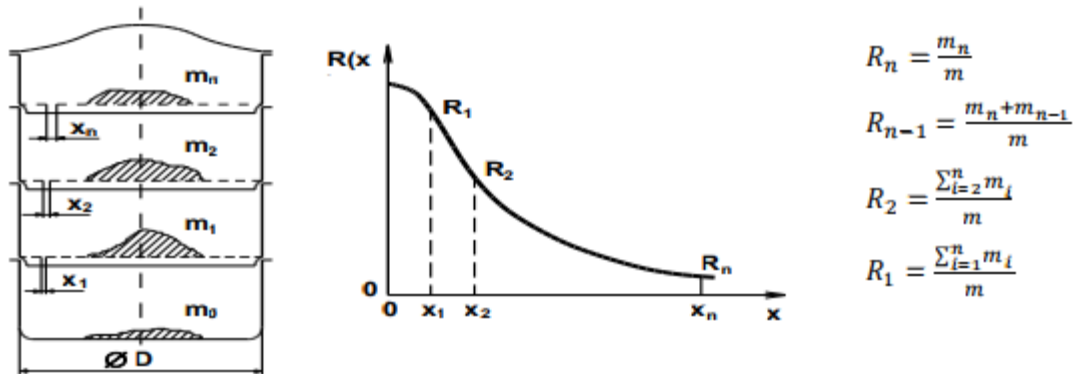
Udává hmotnostní podíl zrn xz větších, než je rozměr oka síta x v závislosti na x .

$$R(x) = \frac{\Delta m(x_z > x)}{m}$$

Kde:

Δm [g] - hmotnost zrn s rozměrem ok x a větších

m [g] - hmotnost celkové navážky vzorku



Obrázek 47 - Schéma sítové analýzy + křivka rozsevu Zdroj: [20]

7.3.1.2. Křivka propadu

Udává hmotnostní podíl zrn o velikosti $xz = x$ a menších, než je rozměr oka síta x v závislosti na x .

$$P(x) = \frac{\Delta m(x_z \leq x)}{m}$$

Kde:

Δm [g] - hmotnost propadu na sítě s rozměrem ok rovným x

m [g] - hmotnost celkové navážky vzorku.

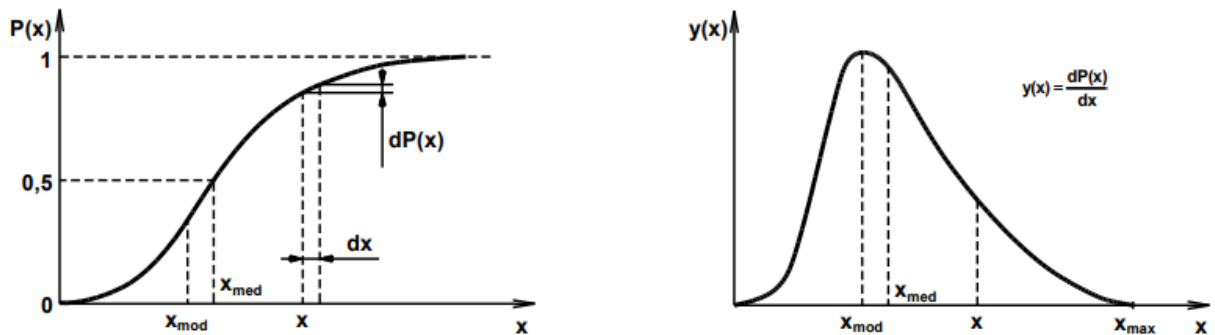
Mezi hodnotami křivky rozsevu a křivky propadu platí vztah:

$$P(x) + R(x) = 1$$

7.3.1.3. Křivka četnosti

Křivka četnosti je derivační křivkou křivky propadu. Lze vyjádřit jako hmotnostní podíl zrn připadajících na odpovídající interval rozměru ok.

$$y(x) = \frac{dP(x)}{dx} = \frac{\text{Hmotnostní podíl náležející intervalu } x_i \text{ až } x_{i+1}}{\text{Šířka intervalu rozměrů ok } x_{i+1} - x_i} \quad [1/\text{mm}]$$



Graf 1- Křivka propadu a křivka četnosti Zdroj: [20]

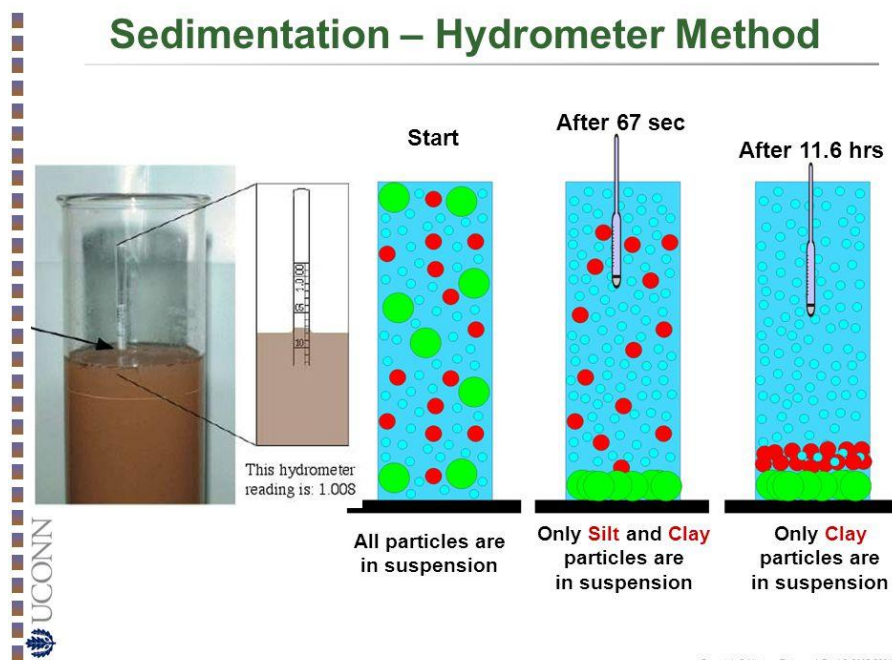
7.3.2. Hydrometrická a pipetovací metoda

Hydrometrická metoda používá hydrometr s certifikovanou stupnicí a váhou k měření hustoty suspenze. Hustota suspenze závisí na hmotnosti a objemu částic v roztoku. [21] Tato metoda definuje rozměr částice na základě Stokesova zákona, tj. ekvivalence rychlosti usazování stejně velké etalonové koule (s tzv. „Stokesovým průměrem“) ve stejné kapalině. Pro volbu hustoty materiálu se obvykle používá hustota křemene. [22] Toto zjednodušení počítá s následujícími předpoklady: Částice jsou dokonale tuhé, hladké a mají tvar koule, mají podobnou hustotu. Mezičásticové interakce a interakce se stěnami sedimentační nádoby jsou zanedbatelné, částice jsou dostatečně malé, aby byla zajištěna podmínka laminárního toku roztoku. [23]

Vzhledem k výše uvedeným předpokladům musíme při vyhodnocení výsledků počítat s jistou chybou způsobenou odchylkami od předpokladů Stokesova zákona. Největší chybu tvoří nedokonalosti tvaru částic, která způsobuje odchylku průřezu částice oproti jejímu objemu a dochází tak ke změně sedimentační rychlosti. Tento fakt byl potvrzen v roce 2000 pomocí experimentu: „The accuracy of hydrometer analysis for fine-grained clay particles.“ Analýza ukázala, že pro částice tvaru disku a tyče o velikostech od 0,1 μm do 100 μm Stokesův zákon podceňuje maximální velikost částic až o dva řády. [24]

Hydrometrická metoda představuje "standard" pro analýzu velikosti částic půdy.

Sedimentation – Hydrometer Method



Obrázek 48 - Hydrometrická metoda Zdroj: [25]

7.3.3. Metoda laserové difrakce (LDM)

Základním principem LDM je vyhodnocení difrakce laserového paprsku na souboru částic. Laser je v tomto případě zdrojem krátkovlnného koherentního záření, které je na straně snímače zachytáváno a vyhodnocováno. Na částici, dle jejího rozměru, dojde k difrakci, tj. rozptylu paprsku. Úhel a intenzita jsou přesně snímány a na základě této informace dojde k vyhodnocení velikosti částic ve vzorku. [17]

LDM je dnes hojně využívána hlavně díky nenáročnému a rychlému průběhu zkoušky (doba trvání na vyhodnocení jednoho vzorku je 5-10 min). Další výhodou je možnost měření nejen plně disperzních vzorků.

K určení velikosti částic se používá měření podle těchto dvou postupů: Fraunhoferova difrakce a Mieova teorie. Oba tyto postupy předpokládají sférický tvar částice.

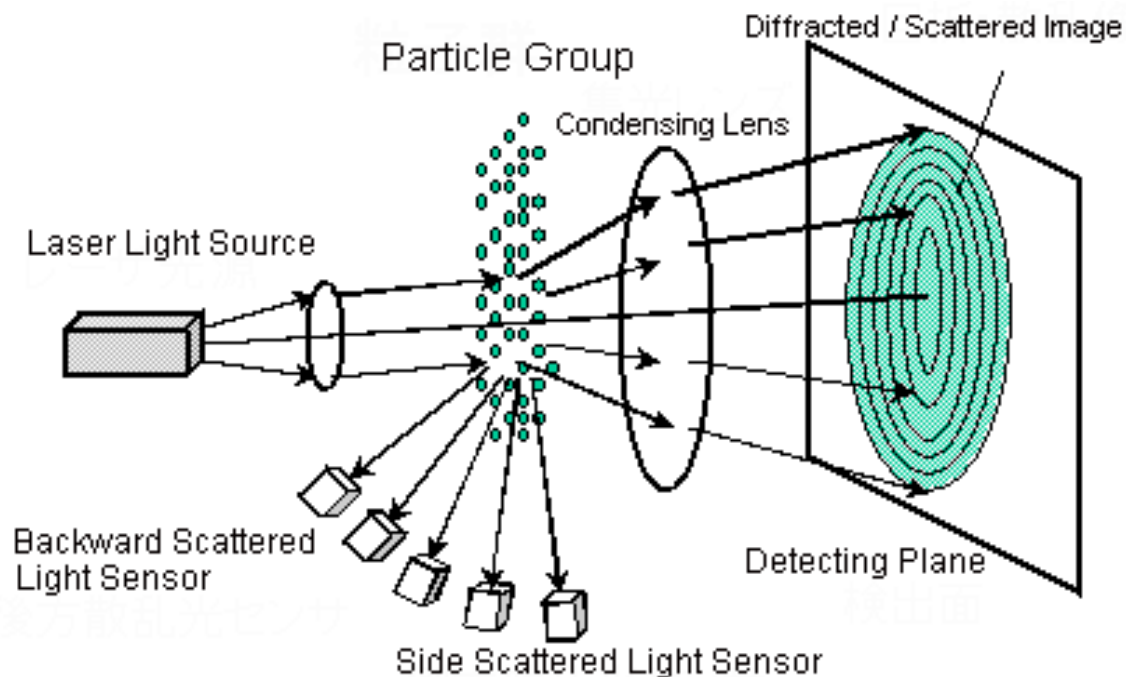
7.3.3.1. Fraunhoferova difrakce

Tato teorie staví na předpokladu, že detektor je ve velké vzdálenosti paralelně se zdrojem a že jeho plocha je nesrovnatelná s velikostí měřených částic. Tato metoda je nepřesná pro částice, jejichž charakteristický rozměr se blíží vlnové délce světla laseru, a proto by měla být použita pro rozměry $< 10 \lambda$ [26]

7.3.3.2. Mieova teorie

Tato teorie vychází z řešení Maxwellových rovnic. Díky tomu, že počítá i s průchodem záření skrz částice, je nutno znát jejich reflexní index, který závisí nejen na jejich rozměru, ale i materiálu.

[26]



Obrázek 49 - Zařízení pro měření pomocí laserové difrakční metody Zdroj: [27]

7.3.3.3. Zařízení pro laserovou metodu - Malvern Spraytec

Malvern Spraytec je přístroj k měření velikosti kapiček aerosolu pomocí metody LDM. Přístroj zpracovává data rozptylu s frekvencí 10 kHz a tím je schopen zachytit a kompenzovat jakékoliv výkyvy měřených hodnot aerosolu. Výpočet pracuje na základě několikanásobného výpočtu a následné normalizace rozptylového algoritmu. Sonda pracuje až do 98 % zatemnění a tím se řadí mezi nejpřesnější a nejlepší přístroje na trhu. [28]

Využití

- Kontrola množství léčiv
- Měření počtu a velikosti vdechovaných a vydechovaných částic
- Měření charakteristik povlakovacího aerosolu

Tabulka 6 - Technické specifikace (zkráceno) Zdroj: [28]

Technické specifikace	
Princip měření	LDM
Měřitelný rozsah	0.1 μm - 2000 μm
Optické modely	Mieova teorie and Fraunhofer Aproximace + několikanásobný výpočet rozptylového algoritmu
Rozsah čoček	300 mm čočky: 0.1 μm - 900 μm (Dv50: 0.5 μm - 600 μm) 750 mm čočky: 2.0 μm - 2000 μm (Dv50: 5 μm - 1600 μm)
Pracovní rozsah	150 mm na 0.5 μm rozšíření >1 m na 5 μm
Maximální koncentrace	Maximální tlumení: 95 % (závisí na velikosti částic)
Detekční systém	36 Elementové diodové detektorové pole s logaritmickou vzdáleností
Zroj záření	632.8 nm, \leq 5 mW helium-neon laser
Bezpečnost	Class 3R laser product
Optický zarovnávací systém	Automatický systém rychlého vyrovnání
Maximální snímací frekvence	Kontinuální režim: 1 Hz Rychlý režim: standardně 2,5 kHz, 10 kHz s doplňkovým softwarem
Přesnost	Lepší než +/- 1 % na modelu Dv50 pro standardy sledující latex NIST



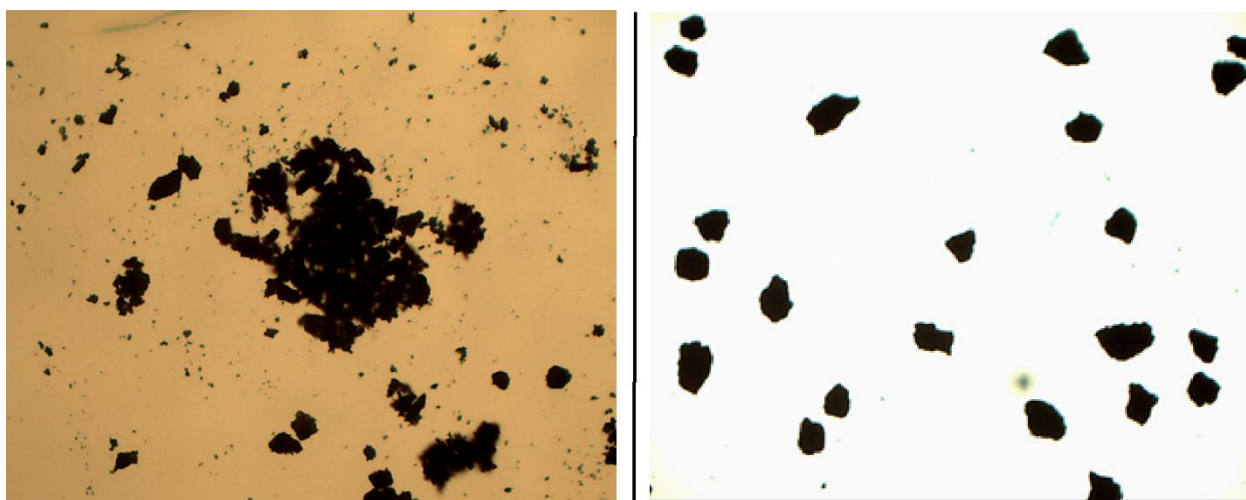
Obrázek 50 – Malvern Spraytec Zdroj: [28]

7.3.4. Optická analýza pomocí mikroskopu

Fotogrammetrie je metoda analýzy objektů z fotografií. V současné době se pro analýzu fotografií používají různé softwarové nástroje. Jedním ze základních předpokladů správného určení rozměru objektu na fotografii je znalost parametrů fotoaparátů a správně provedená kalibrace pomocí kalibračního terčíku se známým rozměrem.

7.4. Testovací měření, popis průběhu a problémů

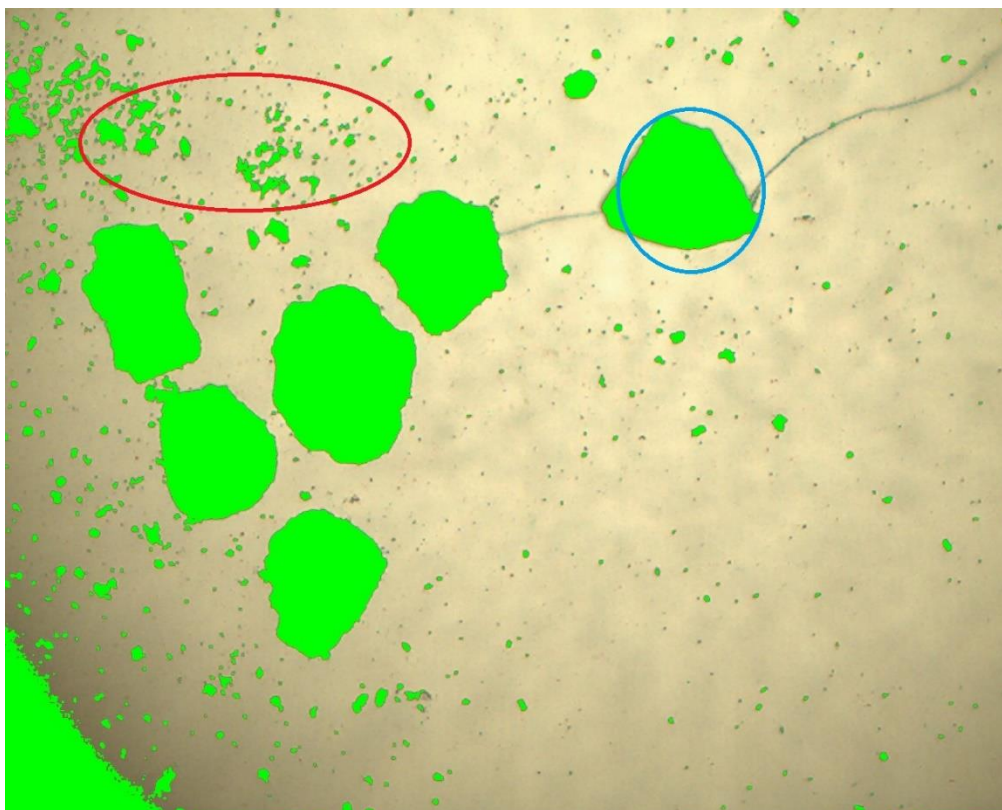
Pro stanovení přesnosti metody obrazové analýzy jsem použil známý vzorek přesítovaného uhlí o rozměru 63-90 μm . Tento vzorek jsem aplikoval na mikroskopické sklíčko v co nejtenčí možné vrstvě, aby nedocházelo ke shlukům částic. Vzorek jsem vyfotografoval pomocí mikroskopu a fotografii podrobil nejdříve manuální analýze a poté automatickému vyhodnocení. Pro správné vyhodnocení obrazu bylo nutné software zkalibrovat. Kalibraci jsem provedl pomocí kalibračního terče Usaf 1951 1x Edmund² a následně jsem si přesnost ověřil na přesně vyrobených drátcích.



Obrázek 51 - Porovnání správně naneseného vzorku bez shluků (vpravo) a špatně naneseného vzorku se shluky (vlevo)

Na obrázku 52 je jasně vidět rozdíl mezi správně rozloženým vzorkem, který umožňuje snadnou analýzu a vzorkem se shluky, který zamezuje jakémukoliv rozeznání jednotlivých částic, a tak i jejich analýze. Pro zlepšení aplikace vrstvy na sklíčko jsem začal využívat laboratorní skalpel, na jehož špičce mohu nabrat a vyselektovat pouze omezené množství částic a tím zaručit tenkou vrstvu. Během svých experimentů jsem zjistil, že částice od rozměru 30 μm a níže je i touto metodou velice složité nanést tak, aby nedošlo ke shlukům, a to zejména kvůli působení elektrostatických sil. K malému zlepšení lze přispět vysušením vzorku.

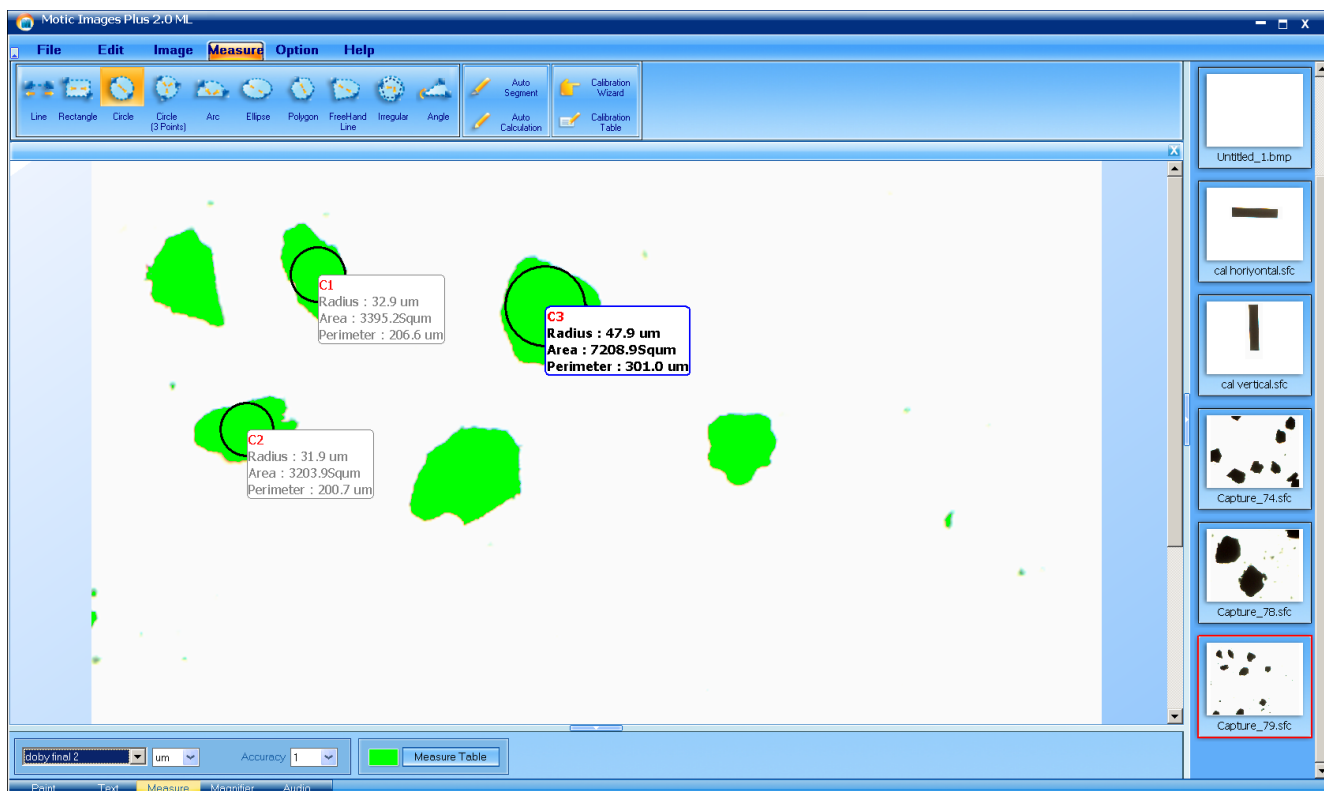
² Jedná se o standardní kalibrační terč od společnosti Edmund optics. Více na <https://www.edmundoptics.com/test-targets/resolution-test-targets/1951-usaf-glass-slide-resolution-targets/>



Obrázek 52 - Vysoký počet nerelevantních částic (červeně) relevantní částice (modře)

Na obrázku 53 je vidět extrémní výskyt nerelevantních částic, které působí chyby v měření. Tyto částice se v obraze vyskytly rozdrolením částic uhlí při aplikaci na sklíčko, ale častěji jsou to zaznamenané částičky prachu. Tyto částice a jejich průměry je nutno z výsledku automatické analýzy obrazu vyfiltrovat. Musíme počítat, že ve výsledcích bude až 80 % vyhodnocených objektů (zejména u jemnějších frakcí) patřit těmto nerelevantním částicím, avšak nejedná se o chybu měření. Abychom minimalizovaly výskyt nerelevantních částic, musíme udržovat čistotu mikroskopu, ale také fotografovat s vyšší intenzitou světla, které prachové částice „zneviditelní“.

Pro odfiltrování špatných rozměrů použijeme filtr, který připustí pouze limitní průměry odvozené z rozměrů síta, na kterém byl vzorek odebrán.



Obrázek 53 - Segmentovaný obraz + manuální analýza rozměru

Z obrázku 54 je patrné, že částice mají nepravidelný tvar a je nutné zvolit adekvátní poloměr, zvolit, zda budeme nahrazovat tvar kružnicí, čtvercem nebo mnohoúhelníkem. Já jsem pro zjednodušení použil kružnici.

Z výsledků manuálního měření vzorku v rozsahu 60-90 μm je viditelné, že některé částice při náhradním výpočtu přes kružnici spadají do rozmezí jen v některém směru. Pro kompenzaci nepravidelnosti tvaru a možnému „zploštění“ tvaru částice jsem se rozhodl přidat 10 % na každou stranu rozmezí a takové částice brát jako vyhovující.

Tabulka 7 - Výsledky automatického měření

5					
63-90 um					
No	Area	Perimeter	D Area	D Perimeter	Diameter avarage
-	Sq um	um	um	um	um
8	0,9	3,8	1,07	1,21	1,14
11	0,9	3,8	1,07	1,21	1,14
9	2,7	7	1,85	2,23	2,04
4	5,4	9,5	2,62	3,02	2,82
16	10,8	13,7	3,71	4,36	4,03
12	17	16,7	4,65	5,32	4,98
18	22,4	19,9	5,34	6,33	5,84
14	24,2	20,5	5,55	6,53	6,04
19	44,8	25,9	7,55	8,24	7,90
10	60	38	8,74	12,10	10,42
13	69	42,1	9,37	13,40	11,39
24	108,4	45,8	11,75	14,58	13,16
22	266,1	100,7	18,41	32,05	25,23
20	361,1	77,5	21,44	24,67	23,06
17	410,3	78,4	22,86	24,96	23,91
23	4304,1	284,3	74,03	90,50	82,26
6	5157,9	294,3	81,04	93,68	87,36
5	6121,1	356,8	88,28	113,57	100,93
15	6235,8	323,8	89,10	103,07	96,09
1	6591,4	366,7	91,61	116,72	104,17
2	6686,4	363,3	92,27	115,64	103,96
21	7385,2	353,6	96,97	112,55	104,76
3	10036,3	412,5	113,04	131,30	122,17
7	11026,4	439,5	118,49	139,90	129,19

V tabulce 7 jsou uvedeny výsledky automatické analýzy rozměrů částic. Žlutě jsou vyznačeny výstupní data ze softwaru automatického měření. Tento software mi poskytuje definované sériové číslo, plochu a obvod lokalizovaného objektu. Červeně jsou vyznačeny nerelevantní částice, které řádově neodpovídají předpokládaným rozměrům. Dále jsem pro vyhodnocené částice charakteristického průměru použil výpočet pomocí náhradního kruhu a spočetl jsem průměr z obvodu a obsahu objektu. Obě hodnoty jsem zprůměroval.

Částice, u kterých alespoň jeden vypočtený průměr odpovídá předpokládanému rozšířenému rozmezí, jsou v tabulce vyznačeny zeleně. V tomto konkrétním případě vidíme, že testem prošlo 7 z 9 částic.

7.4.1. Závěry testovacího měření

Z výsledků testovacího měření lze usoudit, že se podařilo zkalibrovat software pro automatické vyhodnocení rozměrů objektů. Při rozšíření rozmezí velikosti o opravný koeficient 10 % a aplikaci filtru nerelevantních částic lze získat přijatelnou přesnost dosažených výsledků.

Pro další zlepšování přesnosti by bylo nutné vyvinout metodu nanášení vzorku na sklíčko, při které by nedocházelo k částečnému rozpadu vzorku, ale také ke shlukování částic. Během nanášení je nutné pracovat s dobře vysušeným vzorkem a mikroskopem nekontaminovaným částicemi prachu.

7.5. Experiment - porovnání sítové analýzy a optického vyhodnocení

7.5.1. Návrh experimentu

Pro testování byl použit vzorek uhelného prachu, který byl vysušen v sušičce předehřáté na 120°C. Poté byl na vzorku proveden granulometrický rozbor pomocí sítové analýzy a následně byl z každého síta odebrán vzorek uhlí pro podrobnou analýzu fotogrammetrie pomocí mikroskopu.

Po vyhodnocení výsledků z měření obou metod byly zkonstruovány distribuční funkce pomocí programu Excel. Výsledky jsem mezi sebou porovnal a stanovil vzájemnou odchylku.

7.5.2. Výsledky granulometrie

Granulometrická metoda byla provedena na vzorku uhlí původem z tepelné elektrárny Mělník. Vzorek byl nejprve vysušen v sušce při teplotě 120 °C po dobu 45 minut. Poté byl dán do střešovacího stroje na dobu 45 minut se střešacím cyklem v periodách 10 s. Použitá soustava sít uvedena v tabulce 8.

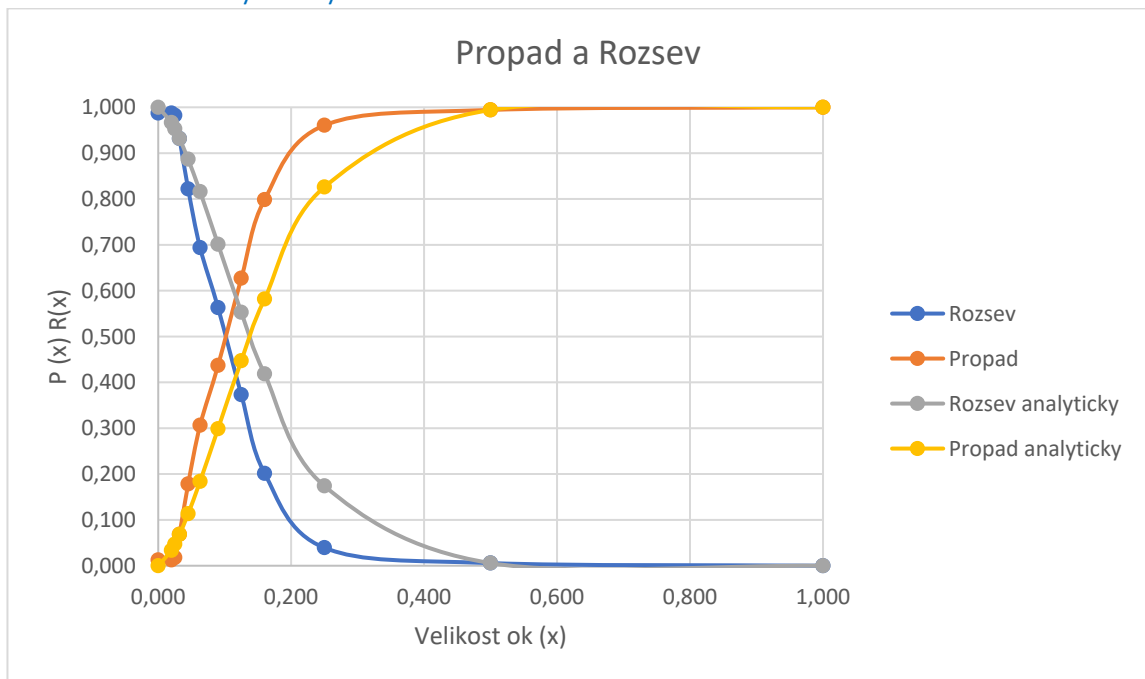
Tabulka 8 - Výsledky granulometrie

Hustota		1850		Hmotnost kádinky a vzorku:		274,58		
i	Velikost Ok síta	Váha misky	Váha misky S navážkou	Hmotnost navážky	Rozsev			
	x _i [mm]	M _i [g]	M _{i+m_i} [g]	m _i [g]	R(x)			
					z měření	analyticky	n	b
0	0,000	46,981	46,981	0,000	0,987	1,000	1,561	15,225
1	0,020	41,459	41,980	0,521	0,987	0,967	1,561	15,225
2	0,025	40,203	45,470	5,267	0,982	0,953	1,561	15,225
3	0,032	40,855	52,310	11,455	0,932	0,932	1,561	15,225
4	0,045	45,213	58,560	13,347	0,822	0,887	1,561	15,225
5	0,063	41,357	54,960	13,603	0,694	0,816	1,561	15,225
6	0,090	43,087	62,890	19,803	0,563	0,701	1,561	15,225
7	0,125	41,052	58,910	17,858	0,373	0,553	1,561	15,225
8	0,160	41,826	58,730	16,904	0,202	0,418	1,561	15,225
9	0,250	46,003	49,490	3,487	0,039	0,174	1,561	15,225
10	0,500	42,182	42,780	0,598	0,006	0,006	1,561	15,225
11	1,000	39,331	39,331	0,000	0,000	0,000	1,561	15,225

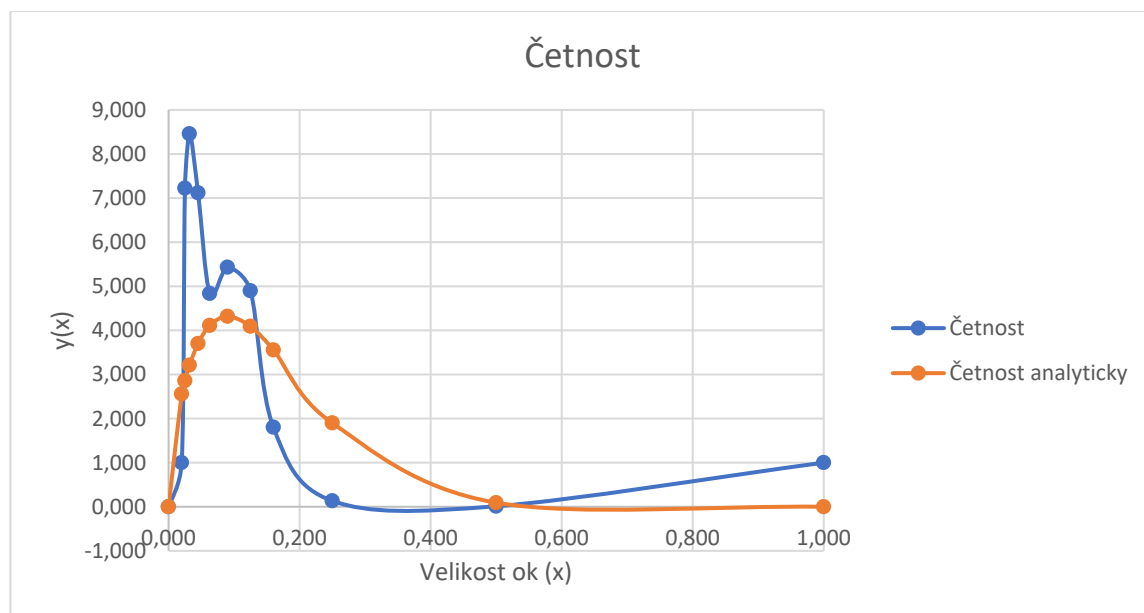
		Hmotnost kádinky:		170,42		Hmotnost vzorku:			104,16	
i	Velikost Ok síta	Propad		Četnost		Rozměr Zrna	Hmotnost zrna			
	x _i [mm]	P(x)		y(x) [m ⁻¹]		[m]	m(x) [kg]			
		z měření	analyticky	z měření	analyticky		koule	kostka		
0	0,000	0,013	0,000	0,000	0,000	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00		
1	0,020	0,013	0,033	1,000	2,559	2,24E-05	1,08E-11	2,07E-11		
2	0,025	0,018	0,047	7,224	2,860	2,83E-05	2,19E-11	4,19E-11		
3	0,032	0,068	0,068	8,460	3,211	3,79E-05	5,29E-11	1,01E-10		
4	0,045	0,178	0,113	7,119	3,700	5,32E-05	1,46E-10	2,79E-10		
5	0,063	0,306	0,184	4,837	4,112	7,53E-05	4,14E-10	7,90E-10		
6	0,090	0,437	0,299	5,432	4,317	1,06E-04	1,16E-09	2,21E-09		
7	0,125	0,627	0,447	4,899	4,092	1,41E-04	2,74E-09	5,23E-09		
8	0,160	0,798	0,582	1,803	3,557	2,00E-04	7,75E-09	1,48E-08		
9	0,250	0,961	0,826	0,134	1,900	3,54E-04	4,28E-08	8,18E-08		
10	0,500	0,994	0,994	0,011	0,092	7,07E-04	3,42E-07	6,54E-07		
11	1,000	1,000	1,000	1,000	0,000	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00		

		pom. Rozprášení:		0,012644009	
i	Velikost Ok síta	Počet zrn		Měrný povrch zrn	
	x _i [mm]	n(x)=m _i /m(x) [# /kg]			
		měř. Koule	měř. Kostka	koule [mm ² /kg]	Kostka [mm ² /kg]
0	0,000	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
1	0,020	4,81E+07	2,52E+07	7,56E-02	7,56E-02
2	0,025	2,40E+08	1,26E+08	6,04E-01	6,04E-01
3	0,032	2,16E+08	1,13E+08	9,79E-01	9,79E-01
4	0,045	9,13E+07	4,78E+07	8,13E-01	8,13E-01
5	0,063	3,29E+07	1,72E+07	5,86E-01	5,86E-01
6	0,090	1,71E+07	8,97E+06	6,06E-01	6,06E-01
7	0,125	6,52E+06	3,41E+06	4,10E-01	4,10E-01
8	0,160	2,18E+06	1,14E+06	2,74E-01	2,74E-01
9	0,250	8,15E+04	4,26E+04	3,20E-02	3,20E-02
10	0,500	1,75E+03	9,14E+02	2,74E-03	2,74E-03
11	1,000	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

7.5.2.1. Výsledky



Graf 2 - Propad a rozsev

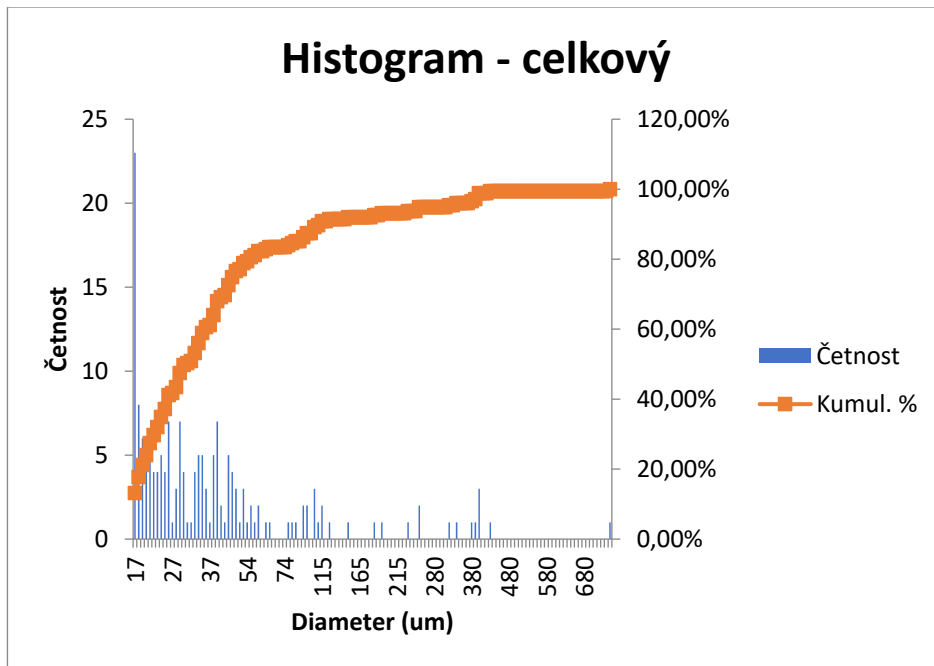


Graf 3 - Četnost

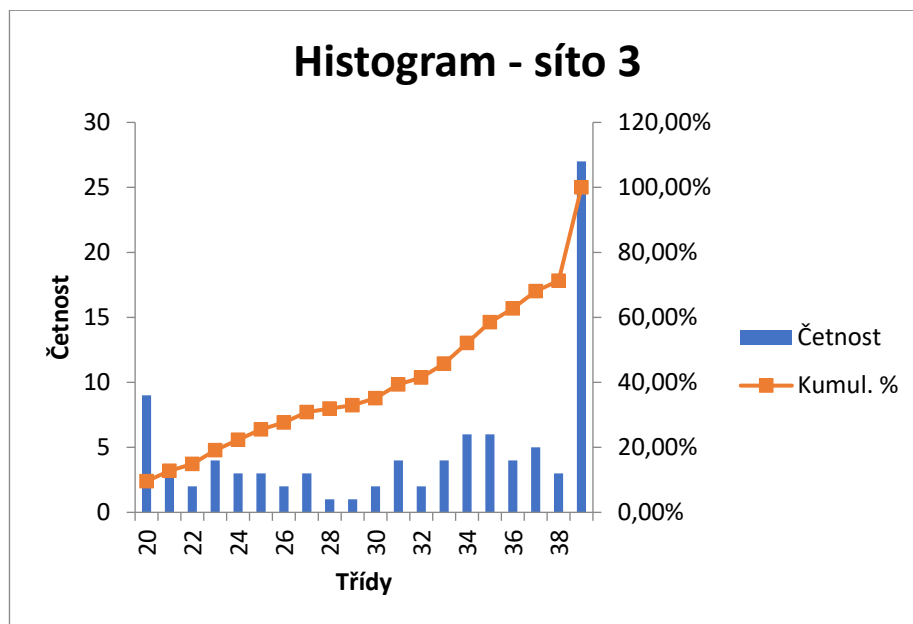
Z výsledků je patrné, že křivky propadu a rozsevu kopírují jejich analytické vyjádření. Můžeme tedy hodnotit experiment jako zdařený.

7.5.3. Fotogrammetrie

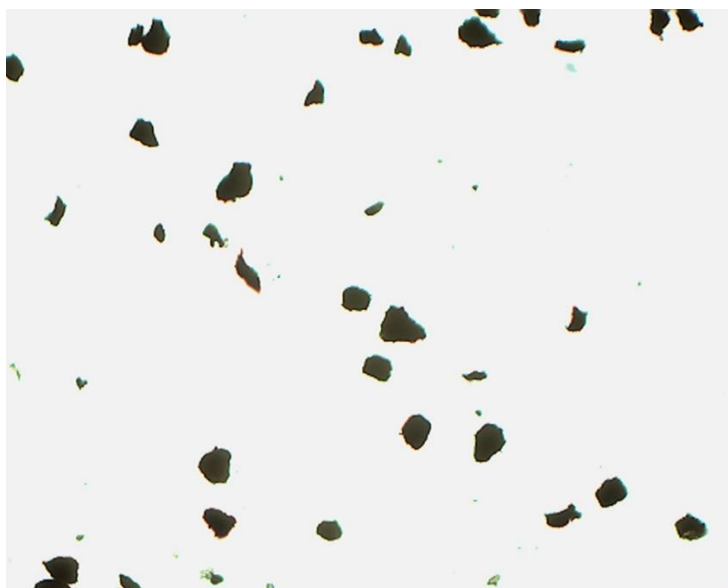
Měření bylo provedeno na mikroskopu Moitic. Z každého síta byly vybrány dva náhodné vzorky, které byly distribuovány rovnoměrně po celém sklíčku za pomoci skalpelu. Z každého vzorku byl vyhotoven jeden snímek a ten byl změřen pomocí nakalibrovaného softwaru, viz kapitola 7.4. Výsledné hodnoty byly zanalyzovány a byly odfiltrovány od šumu pomocí filtru 20 %. Výsledky byly zpracovány do histogramů.



Graf 4 - Histogram celkový



Graf 5 - Histogram síto 3



Obrázek 54 - Foto 1. vzorku z 3 síta

Z výsledků celkového histogramu je patrné, že největší četnost mají částice o rozměrech do 50 μm . Z analýzy histogramu pro jedno síto je patrné, že četnost částic je konstantní a výrazně vybočuje pouze na okrajích intervalu, kam spadají i částice mimo interval ok síta. Tato chyba v měření je způsobena nepřesností výpočtu průměru za pomoci zástupného tvaru (v našem případě koule).

7.5.4. Porovnání výsledků

Z výše uvedených výsledků je patrné, že křivka četnosti a histogram mají srovnatelný trend a oba grafy odpovídají stavu, kdy nejvyšší četnost mají částice s menšími rozměry, s rostoucí velikostí částic četnost výskytu klesá. Je nutno podotknout, že u fotogrammetrického měření může být tento jev zapříčiněn nižším počtem částic v zorném poli objektivu fotoaparátu, viz obrázek 55.

Z experimentu jasně vychází ověření použitelnosti fotogrammetrické metody pro přesnou analýzu rozměru částic, avšak musíme aplikovat matematické metody k filtraci šumu. Fotogrammetrická metoda je časově velice náročná a dovolí nám zpracovat jen omezené množství vzorku. Pro vzorky typu uhlí, kde lze provést snadno síťovou analýzu, bych proto tuto metodu v běžné praxi nepoužíval z důvodu zpracování pouze omezeného množství vzorku za jednotku času.

Ze zkušeností s tímto měřením se mi jeví použití fotogrammetrické metody pro měření objektů, jakou jsou kapičky v proudu přehřáté páry, jako ideální způsob analýzy jejich velikosti. Při tomto měření není totiž nutné vyhodnocovat vysoké množství objektů, ale je potřeba měření provádět bez kontaktu s měřeným médiem.

8. Vlastní experiment na dýze

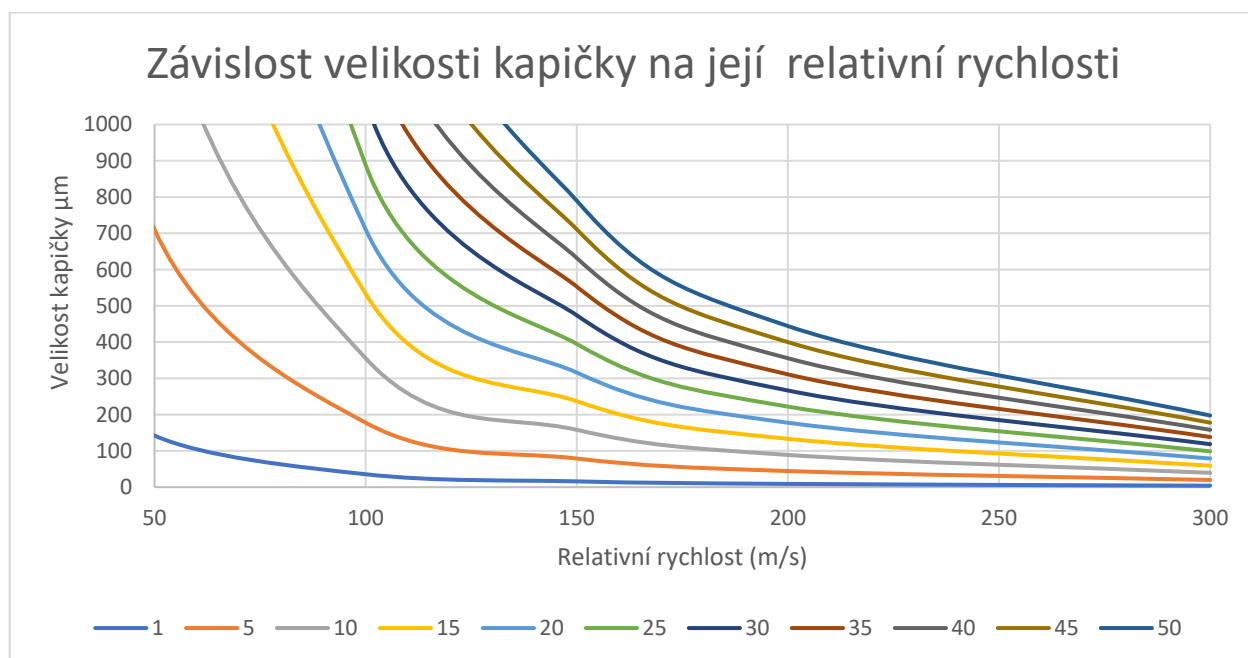
8.1. Návrh a cíle experimentu

Experiment začíná natlakováním vzdušníku kompresoru a přívodního potrubí na předem definovaný tlak. Poté dojde ke spuštění měřícího zařízení a otevření ventilu na ukliďňovací nádobě měřící trati.

Dle poznatků z kapitoly 4. jsem stanovil tabulku předpokládaných velikostí kapiček a provedl jsem citlivostní analýzu pro různé rychlosti kapiček. Weberova čísla uvedená v tabulce 9 vychází ze závislosti vynesných na obrázku 23, která jsou výsledkem pokusů uvedených v publikaci experimentu SVUSS.

Tabulka 9 - Očekávané průměry kapiček stanovené dle experimentu SVUSS

rychlost proudu MA	rychlost kapičky m/s		0	5	10	15	20	30	50	100	150	200	300
	webber	rychlost proudu m/s											
			očekávaný průměr μm										
0,2	18	68	219,53	255,76	301,76	361,38	440,59	702,99					
0,3	24	102	130,09	143,85	159,91	178,82	201,29	261,09	500,55				
0,4	30	136	91,47	98,59	106,57	115,56	125,73	150,57	228,75	1305,45			
0,5	34	170	66,35	70,43	74,90	79,81	85,22	97,83	133,16	391,31	4793,60		
0,6	38	204	51,50	54,12	56,94	59,99	63,30	70,78	90,36	198,13	734,92		
0,7	42	238	41,82	43,63	45,56	47,63	49,84	54,75	67,02	124,38	305,86	1640,31	
0,8	44	272	33,54	34,81	36,15	37,57	39,07	42,37	50,35	83,88	166,72	478,66	
0,9	43	306	25,90	26,77	27,68	28,64	29,65	31,83	37,00	57,14	99,65	215,82	
1	42	340	20,49	21,11	21,75	22,42	23,13	24,65	28,16	41,12	65,61	120,85	1480,38
1,1	39	374	15,72	16,15	16,60	17,07	17,55	18,59	20,95	29,30	43,83	72,65	401,65
1,2	37	408	12,54	12,85	13,17	13,51	13,86	14,60	16,28	22,00	31,35	48,23	178,89



Graf 6 - Závislost velikosti kapičky na její relativní rychlosti

Tabulka 9 ukazuje závislost velikosti kapičky na její rychlosti a rychlosti proudu obtékající tekutiny. Tabulka také respektuje Weberova čísla. V grafu 6 je již vynesena závislost velikosti kapičky na relativní rychlosti proudu. Graf ukazuje situace pro různá Weberova čísla.

8.1.1. Malvern Spraytec měření

Cílem experimentu bylo stanovit časovou závislost průběhu měřených tlaků v dýze během celého průběhu experimentu. Dalším cílem bylo stanovení profilu rychlosti podél celé geometrie dýzy. V následujícím kroku vyhodnocení experimentu probíhá analýza dat z Malvern Spraytec. Cílem této analýzy bylo stanovení standardního profilu distribuční funkce velikosti kapiček a analyzovat, zda je tvar a posunutí této funkce závislý na tlaku a rychlosti proudění. Dalším záměrem bylo stanovit průběh analyzovaného rozměru $D[3][2]$ a $D[4][3]$ na tlaku a odhadnout standardní průběh.

V druhém kole experimentů jsem nahradil Malvern Spraytec kamerou a LED diodou v zapojení popsaném v kapitole 6.2.2.1. S touto aparaturou jsem zopakoval měření se stejnými vstupními podmínkami a zkoumal jsem a porovnával, zda velikost a rozměry kapiček jsou shodné s měřeními na Malvern Spraytecu.

8.1.2. Měření pomocí kamery

Při tomto měření jsem Malvern Spraytec nahradil kamerou a vysokorychlostní diodou, která je schopna dosahovat záblesků dobou trvání v řádech μs . Celou aparaturu jsem nejdříve nakalibroval na měření ve volném prostoru za profilem a pokusil jsem se zachytit kapičky, které jsou unášeny proudem vzduchu. V případě, že se mi kalibrace měření nezdařila, posunul jsem celou aparaturu tak, aby snímala konec profilu a sledoval jsem rozpad vodního filmu a jeho atomizaci na kapičky.

8.2. Kalibrace experimentu

8.2.1. První kalibrační měření na dýze

Při těchto měřeních byl použit pouze dočasný okruh tlakového vzduchu, který je vytvářen přímo v laboratoři za použití laboratorního kompresoru. V prvních kalibračních měřeních bylo zvoleno měření teploty pomocí termočlánku typu T umístěném v uklidňovací nádobě, měření celkového tlaku v uklidňovací nádobě a odběr statického tlaku v místech 1 a 2 na dýze. K vyhodnocení bylo použito záznamové zařízení založené na SW Matlab Simulink. Při těchto měřeních nebyl použit systém pro fotogrammetrické vyhodnocení velikosti kapiček.

Experimenty byly rozděleny do dvou kategorií. V první kategorii experimenty probíhali pouze se stlačeným vzduchem bez injektáže kapiček a byly vyhodnocovány pouze tlaky a teplota. V druhé kategorii

měření byla do proudu stlačeného vzduchu pomocí přesného laboratorního čerpadla injektována voda, aby tvořila kapičky a bylo možné otestovat Malvern Spraytec měření.

8.2.2. Vyhodnocení kalibračních měření

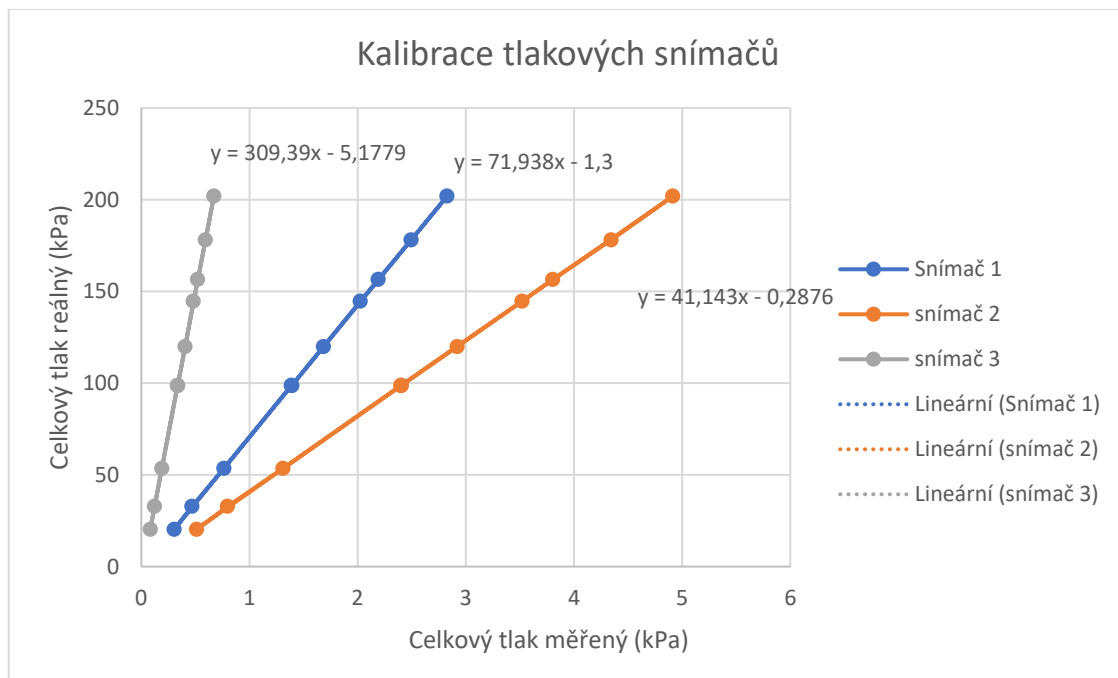
8.2.2.1. Kalibrace tlakových snímačů

Pro přesné určení tlaků jsem provedl kalibraci tlakových snímačů. Celá kalibrace byla provedena na kalibrační trati, která je tvořena již existujícími komponenty trati pro měření tlaku uvnitř dýzy, k nimž je do odvodňovacího kanálu zapojen kalibrační přístroj, díky kterému jsem mohl odečíst přesný přetlak v době měření. Dále jsem pomocí staničního barometru určil přesný atmosférický tlak v místnosti. Součtem obou hodnot jsem vypočítal absolutní tlak a stanovil jsem převodní koeficienty. Z měření jsem došel k následujícím výsledkům.

Tabulka 10 - Naměřené výstupní signály, přepočtené tlaky a odchylky

přetlak (kPa)	0	21,2	45,9	57,8	79,3	103,2	0	-45,2	-65,9	-78,4	0
Celkový tlak (kPa)	98,7	119,9	144,6	156,5	178,0	201,9	98,7	53,5	32,8	20,3	98,7
Snímač 1	1,39	1,68	2,02	2,19	2,49	2,83	1,39	0,76	0,47	0,30	1,39
Snímač 2	2,40	2,92	3,52	3,80	4,34	4,91	2,40	1,31	0,80	0,51	2,40
Snímač 3	0,34	0,41	0,48	0,52	0,59	0,67	0,34	0,19	0,12	0,08	0,33

Z výsledků jsem stanovil kalibrační křivky pro jednotlivé snímače a jejich průběh jsem proložil lineární regresí. Z lineární regrese jsem staval vzorec pro korekci naměřených hodnot.



Graf 7 - Kalibrace tlakových snímačů

Získané kalibrační rovnice jsem použil v následujících měření pro korekci naměřeného tlaku na tlak reálný.

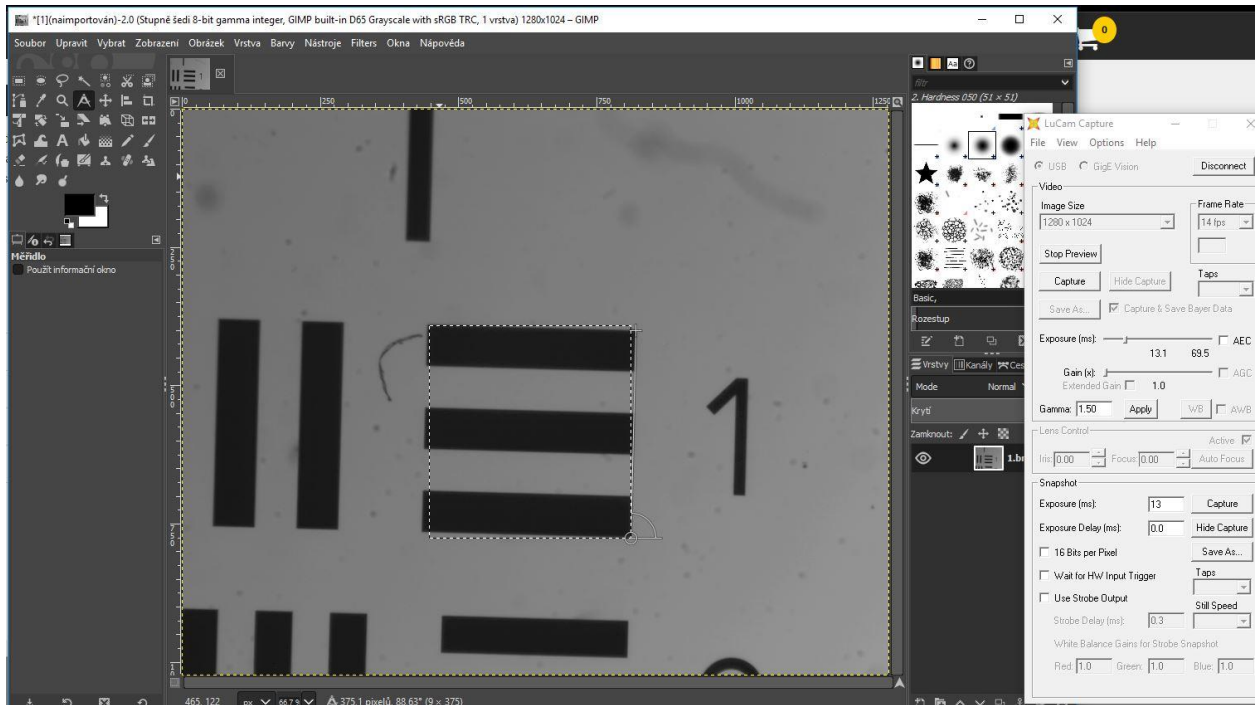
$$y = a * x + b$$

Tabulka 11 - Koeficienty pro přepoččet

	a	b
Snímač 1	71,9382	-1,29998
Snímač 2	41,1433	-0,28755
Snímač 3	309,3946	-5,17794

8.2.2.2. Kalibrace rozlišení kamery

Abych mohl vyhodnocovat data získaná kamerou, musel jsem nejprve nakalibrovat velikost pixelu výsledné fotografie. Kalibraci jsem provedl, stejně jako v případě fotogrammetrie uhlí, pomocí kalibračního terče usaf 1951 1x Edmund. Rozměr objektu na obrázku jsem vyhodnotil pomocí aplikace GIMP.



Obrázek 55 - Kalibrace kamery v SW GIMP

Ze SW GIMP jsem zjistil, že zobrazený objekt má velikost 375 pixelů a v tabulkách pro kalibrační terč jsem zjistil skutečnou velikost objektu, která činí 2 mm. Z této znalosti jsem stanovil velikost 1 pixelu na 5.33 μm .

8.2.2.3. Kalibrace délky záblesku diody

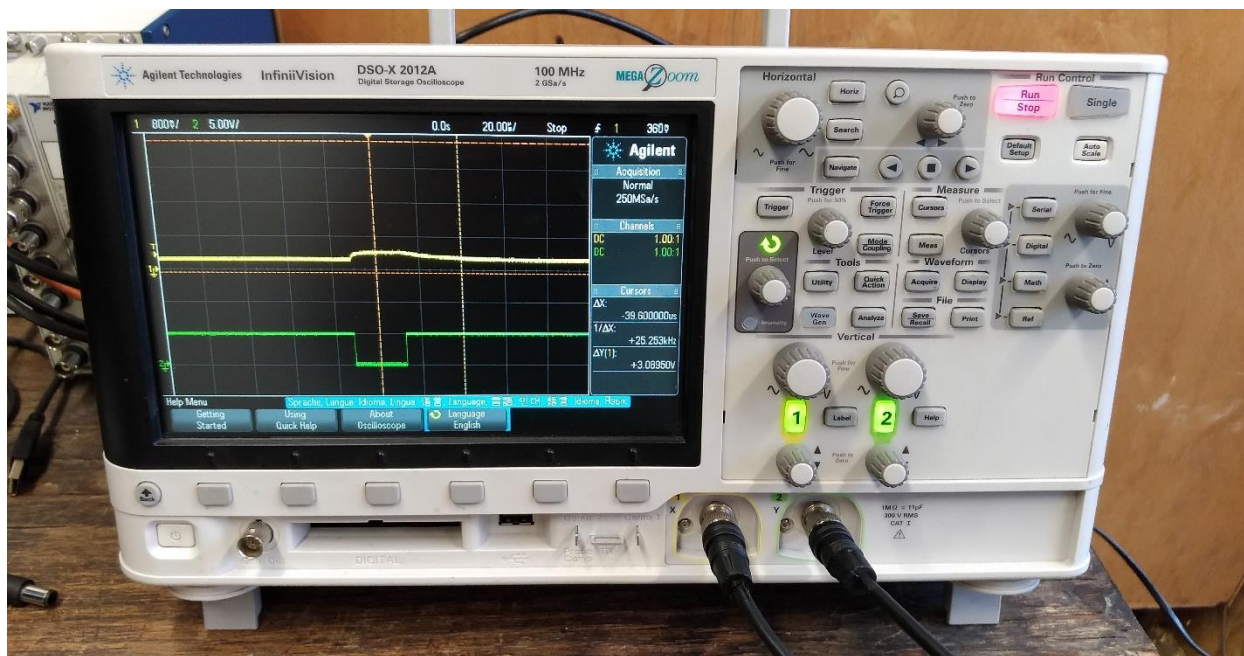
Kamera Lumenera 125 x Edmund optics, kterou jsem použil pro provedení experimentů, má nejkratší možnou dobu závěrky 20 ms. K zachycení fotografií kapiček v proudu vzduchu je tato doba však příliš dlouhá. Ze znalosti rozměrů fotografie 1280 x 1024 px a ze znalosti rozměru pixelu, který jsem určil v kapitole 8.2.2.2, jsem odvodil rozměry fotografie. Rozměry fotografie jsou 6,8 mm x 5,4 mm. Dále jsem předpokládal rychlosti proudění vzduchu v okolí profilu cca 200 až 300 m/s. I kdybych použil minimální dobu závěrky, byla by dráha, kterou kapička za tuto dobu urazí:

$$s = w * t = 250 * 0,02 * 1000 = 12,5 \text{ mm}$$

Tato vzdálenost tvoří téměř dvojnásobek velikosti fotografie, a tudíž by její zachycení téměř nemožné. Možným řešením by bylo použití kamery s kratší dobou závěrky. Tyto kamery jsou však neúměrně drahé. Proto jsem zvolil metodu, kdy jsem obešel minimální dobu závěrky kamery tak, že jsem použil jako zdroj světla rychlozábleskovou diodu, u které jsem reguloval dobu záblesku. Tím se fotografie

snímala jen po dobu záblesku diody a mohl jsem se stejnou kamerou pořizovat snímky v daleko kratších časech.

Za tímto účelem jsem musel pomocí osciloskopu a fotodiody nejprve nakalibrovat stupnici zdroje diody a přiřadit ke každému číslu na stupnici čas záblesku.



Obrázek 56 - Měření doby záblesku pomocí osciloskopu

Dále jsem provedl vyhodnocení daných dob záblesku a výsledné hodnoty jsem linearizoval, abych korigoval chyby při možném nastavení na stupnici a také abych mohl používat neceločíselná nastavení.

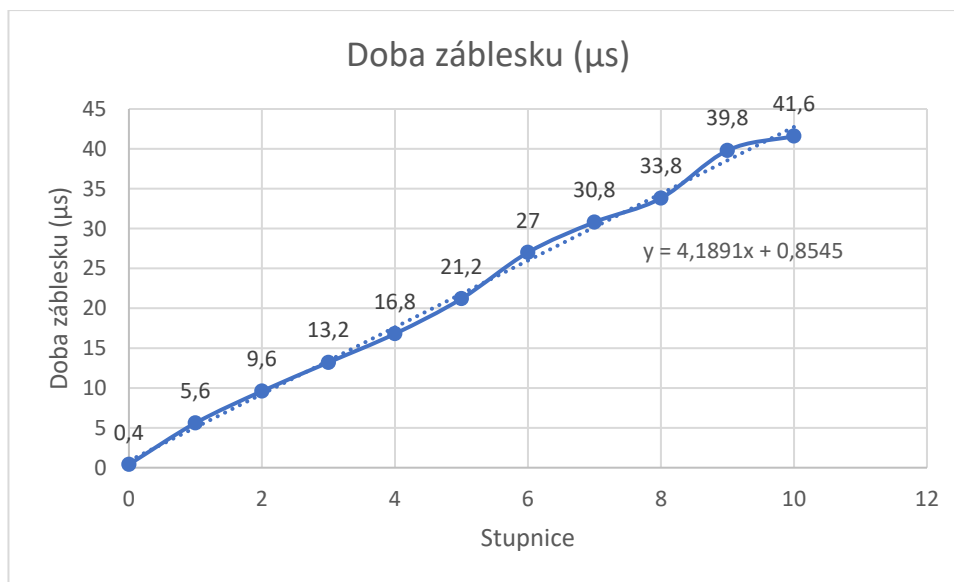


Obrázek 57 - Fotodioda OSRAM Zdroj: [29]

Použitá fotodioda má dobu přitáhu a odpadu na hodnotě 0.005 μs , což zaručilo dostatečnou přesnost pro kalibraci délky záblesku.

Tabulka 12 - Kalibrace - záblesk diody

Číslo na stupnici	Doba záblesku (μs)	Doba záblesku - linearizace(μs)
10	41,6	42,7455
9	39,8	38,5564
8	33,8	34,3673
7	30,8	30,1782
6	27	25,9891
5	21,2	21,8
4	16,8	17,6109
3	13,2	13,4218
2	9,6	9,2327
1	5,6	5,0436
0	0,4	0,8545



Graf 8 - Doba záblesku

Kalibraci doby záblesku jsem použil při dalším vyhodnocení fotografií. Z doby záblesku jsem přesně stanovil rychlost letících kapiček.

8.3. Provedení experimentu

8.3.1. Vyhodnocení teploty

Nejprve bylo potřeba vyhodnotit data z termočlánu, k jejichž vyhodnocení je možné použít převodní Tabulka 5 - Výstupy termočlánu typu T Zdroj: nebo je možno použít převodní rovnice udávané výrobcem. V neposlední řadě je zde možnost využít SW, který je již součástí měřicího přístroje. Pro své měření jsem zvolil použití vlastního SW výrobce. Výsledná hodnota je již ve °C a její vyhodnocení bylo tudíž jednodušší.

Dalším krokem při vyhodnocení byl převod signálu ze snímačů tlaku. Zde byla zvolena metoda převodních (kalibračních) koeficientů, viz kapitola 8.2.2.1. Takto kalibrované hodnoty tlaků můžeme považovat za přesné.

8.3.2. Vyhodnocení tlaku a výpočet rychlosti

Aparatura umožňuje měřit celkový tlak v ustalovací nádobě a dva statické tlaky v různých místech dýzy, které jsou umístěny dle nákresu v kapitole 6.2.2.2. Dalším krokem výpočtu bylo stanovení rovnice pro převod odebíraného celkového tlaku na kritické parametry. Výsledky experimentu, tj. distribuci kapiček, jsem vztáhl k průběhu rychlosti v kritickém průřezu.

8.3.3. Určení kritických parametrů dýzy

Nejprve jsem stanovil kritické parametry dýzy tak, abych mohl určit, zda měřené rychlosti a tlaky se pohybují v podkritické nebo nadkritické oblasti.

Nejprve jsem stanovil kritickou teplotu dle vzorce:

$$T^* = T_0 \frac{2}{\kappa - 1}$$

Z ní jsem určil kritickou rychlost:

$$w^* = \sqrt{\kappa R T^*}$$

Tabulka 13 - Tabulka parametrů – Kritické parametry

T_{krit}	239,3933	K
w_{krit}	406,7189	m/s
p_{krit}	0,633938	kg/m ³
A_{krit}	0,000278	m ²
m_{krit}	0,267487	kg/s

8.4. Měření Malvern Spraytec

Nejprve jsem provedl měření velikosti a distribuce kapiček pomocí metody Malvern Spraytec, jehož princip jsem popsal v kapitole 7.3.3.3. Výsledný hodnoty z Malvern Spraytec jsem srovnal s průběhem rychlosti proudění v kritickém průřezu.

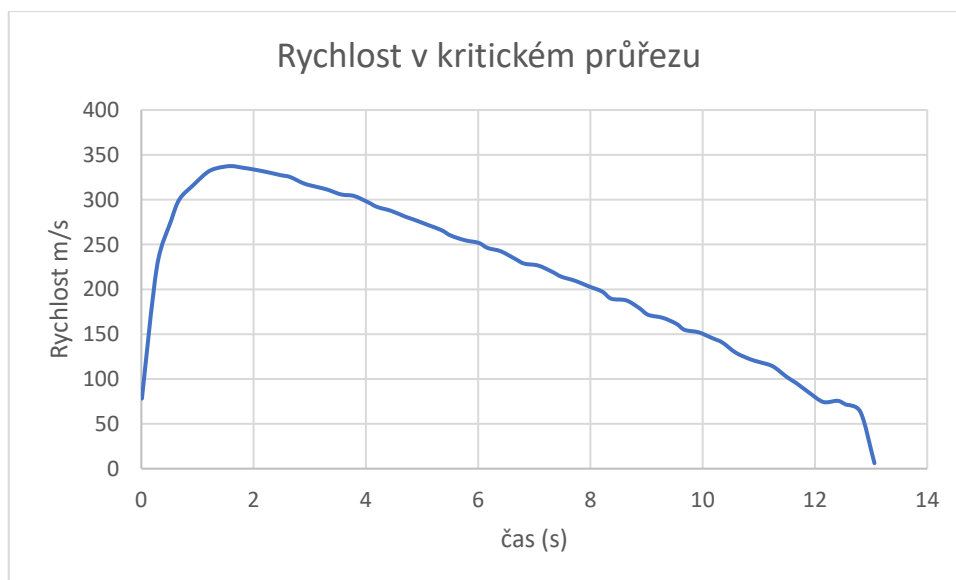
8.4.1. Výsledky měření - Malvern Spraytec

Způsob vyhodnocení výsledku je vzorově proveden na měření 21, kde byl přetlak v zásobníku nastaven na počáteční hodnotu 3 bary. Snímkování pomocí Malvern Spraytec probíhalo v s krokem 0,4 s. Do systému byla injektována DEMI voda pomocí profilu s rychlostí 20 ml/min.

Nejprve jsem provedl přepočít celkového tlaku v uklidňovací nádobě na rychlost v kritickém průměru dle vzorce:

$$M = \sqrt{\frac{2}{\kappa - 1} * \left(\frac{P_0}{P_{ATM}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}$$

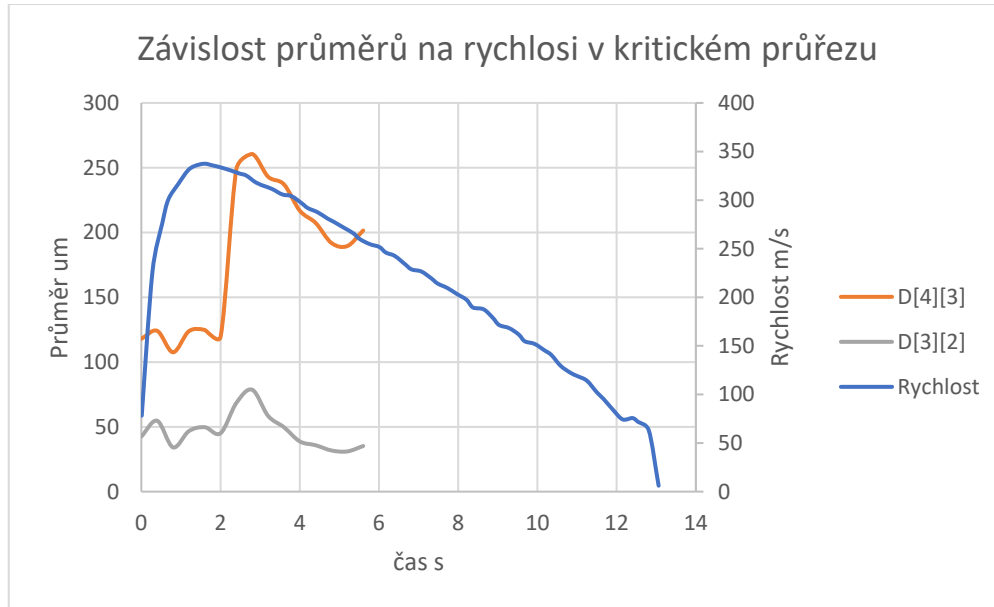
Dále jsem provedl korekci rychlosti na nulovou hodnotu v počátku. Korekci jsem provedl tak, že jsem si stanovil měřenou rychlost v momentu, kdy dýzou neproudil žádný vzduch a tuto hodnotu jsem zvolil jako konstantu pro korekci všech ostatních hodnot. Odchyłka od nulové rychlosti je způsobena nepřesností v měřeném tlaku.



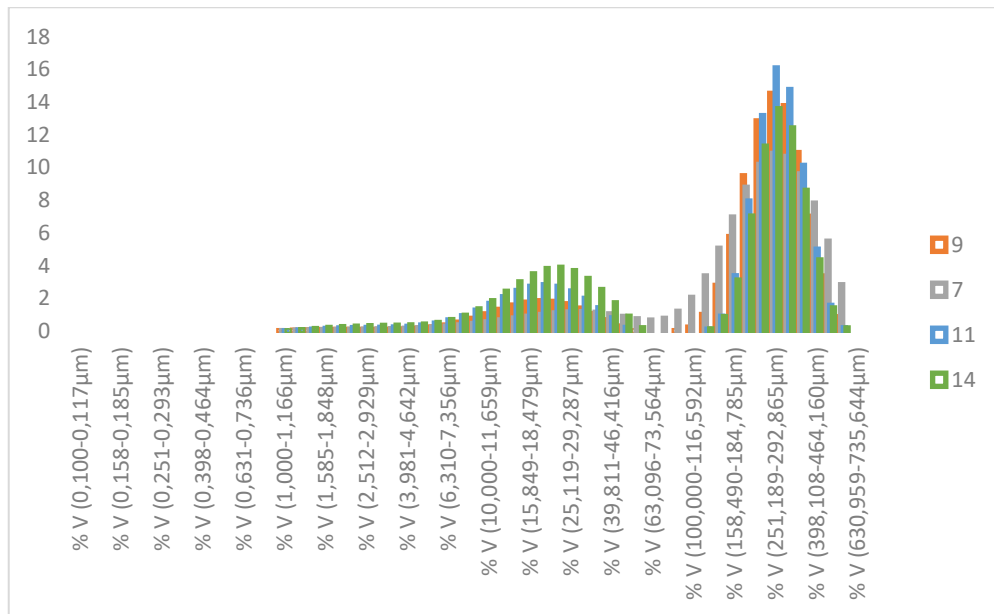
Graf 9 - Závislost rychlosti proudění skrz kritický průřez na čase

Dále jsem vyhodnotil data z měření na Malvern Spraytec a složil je do grafu s rychlostí

Měření 1

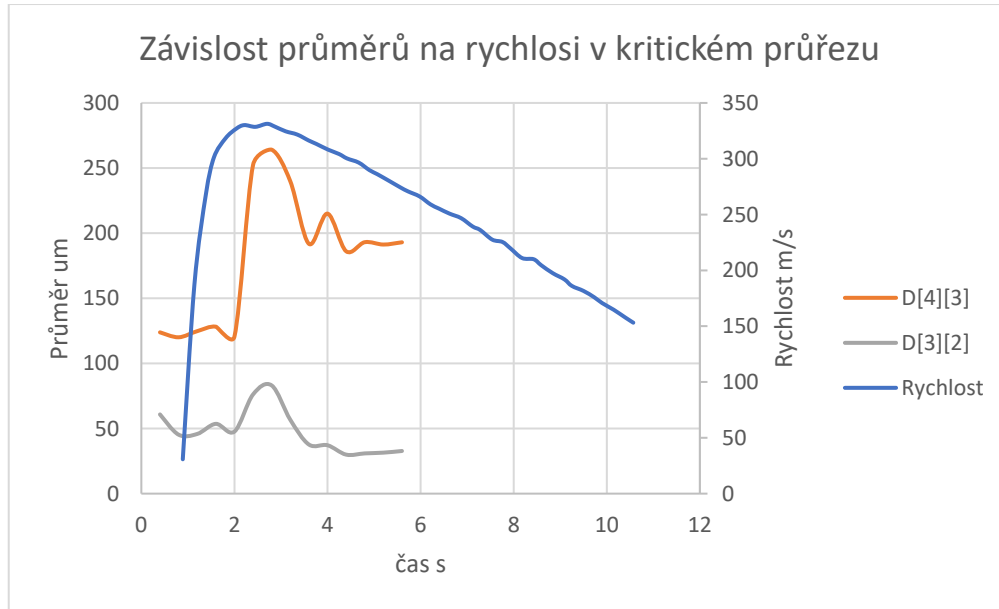


Graf 10 - Průměry v závislosti na rychlosti měření 1

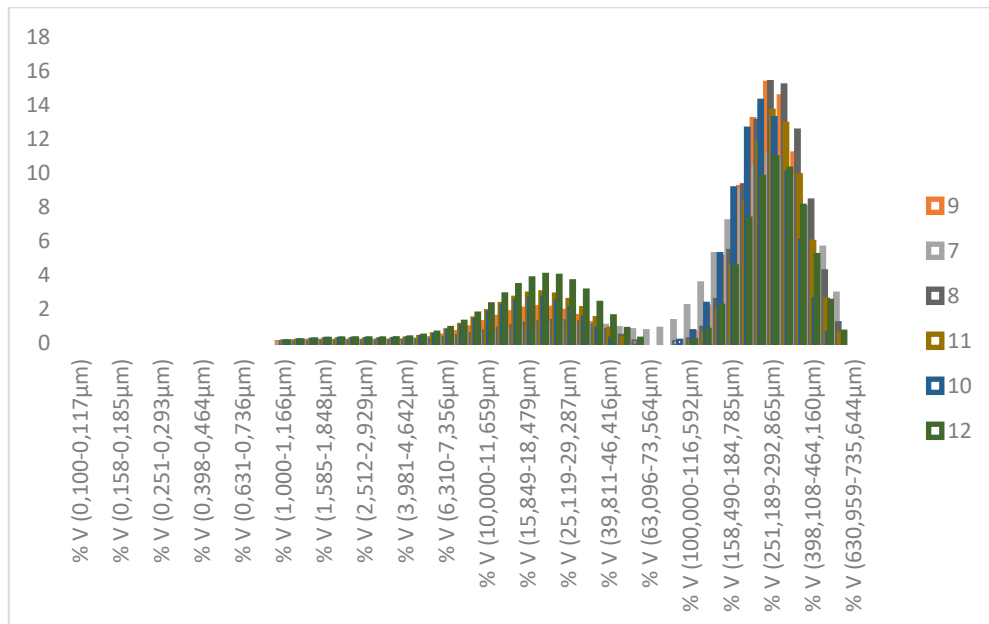


Graf 11 - Distribuční funkce měření 1

Měření 2

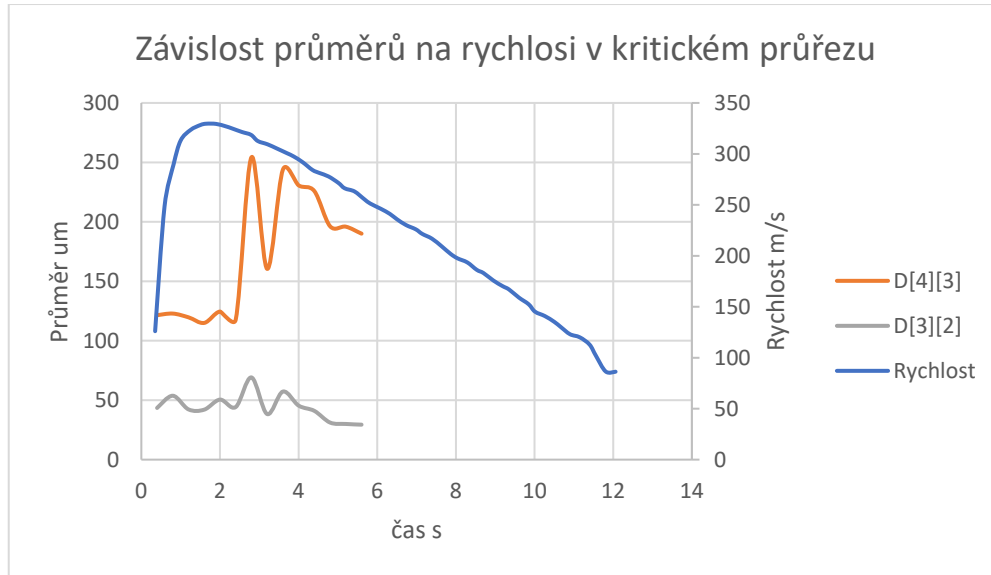


Graf 12 - Průměry v závislosti na rychlosti měření 2

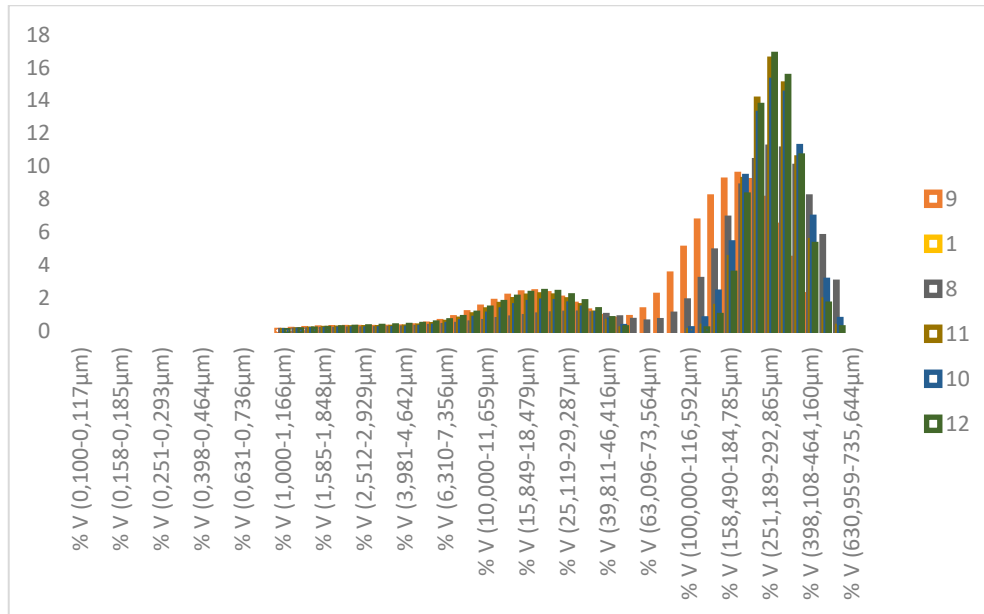


Graf 13 - Distribuční funkce měření 2

Měření 3

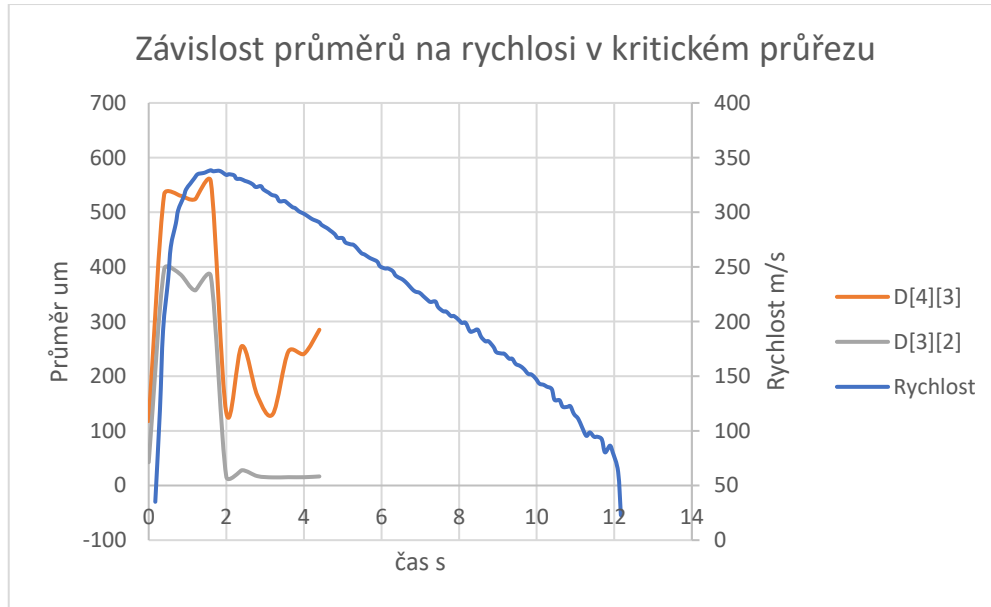


Graf 14 - Průměry v závislosti na rychlosti měření 3

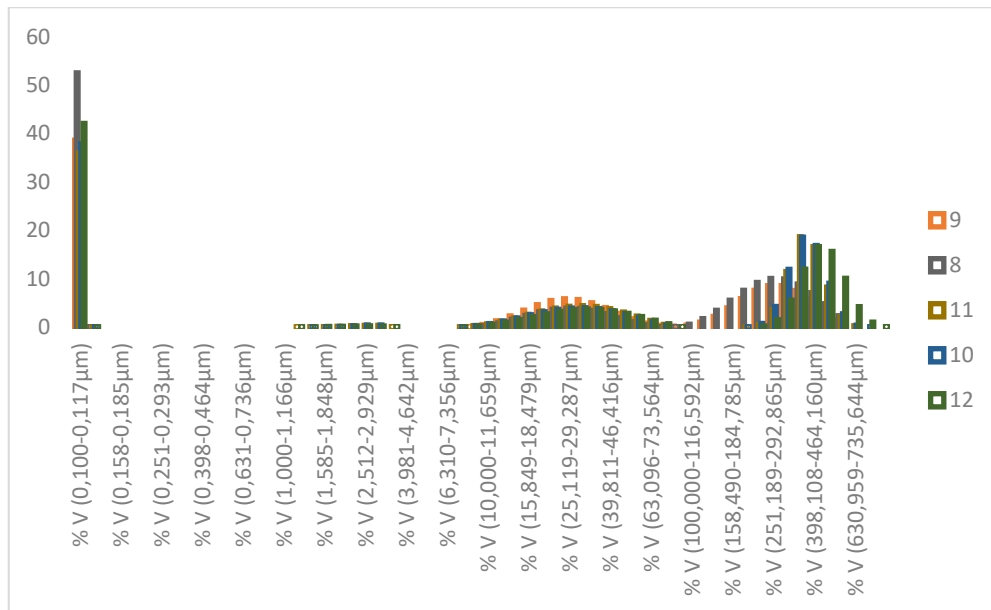


Graf 15 - Distribuční funkce měření 3

Měření 4

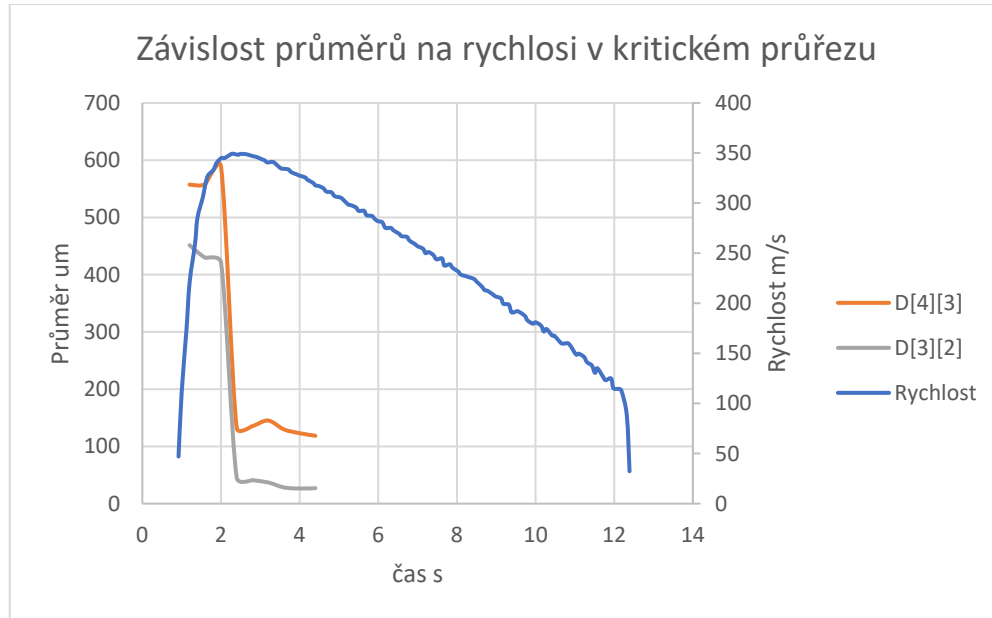


Graf 16 - Průměry v závislosti na rychlosti měření 4

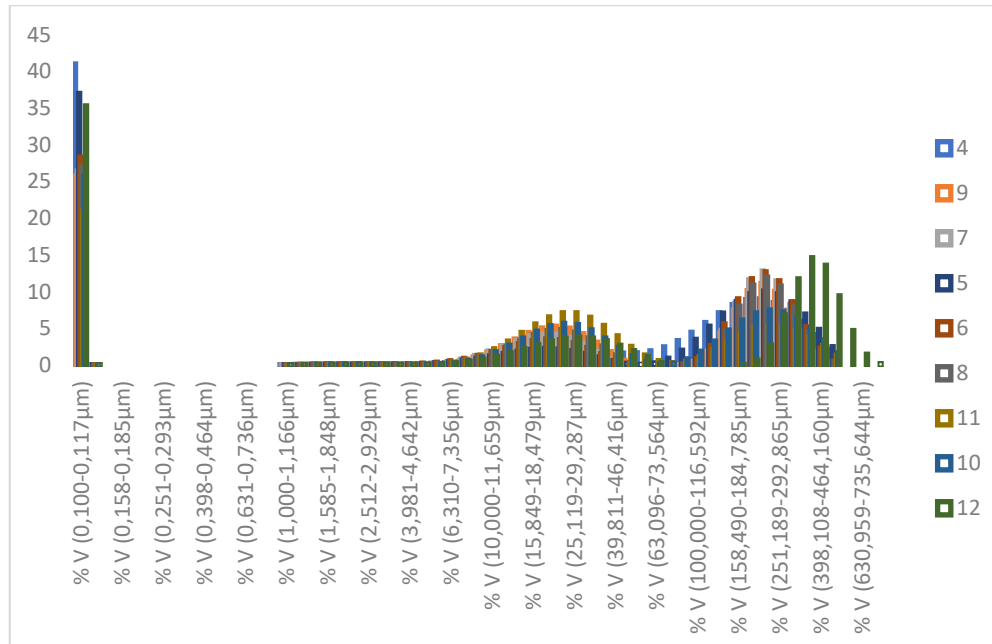


Graf 17 - Distribuční funkce měření 4

Měření 5

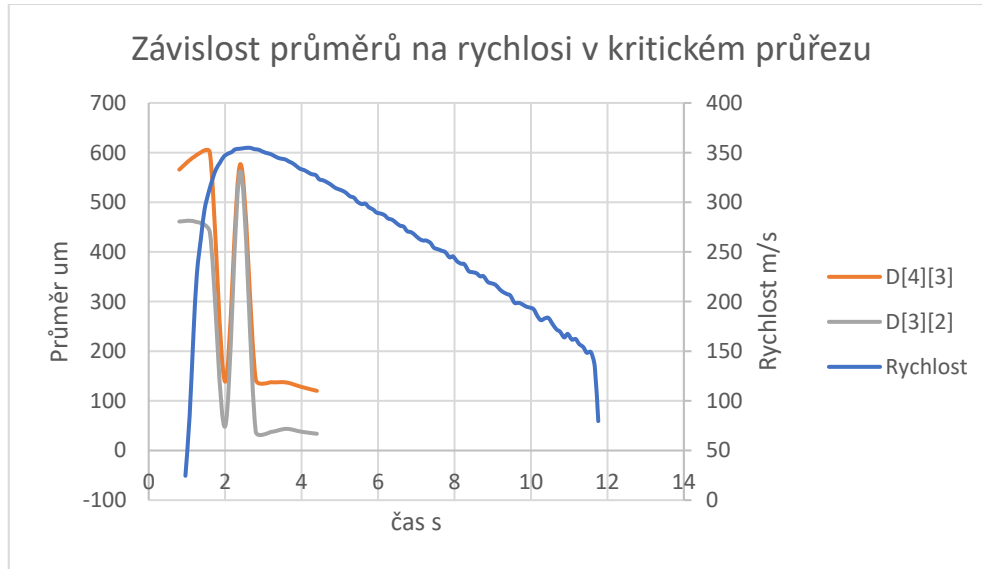


Graf 18 - Průměry v závislosti na rychlosti měření 5

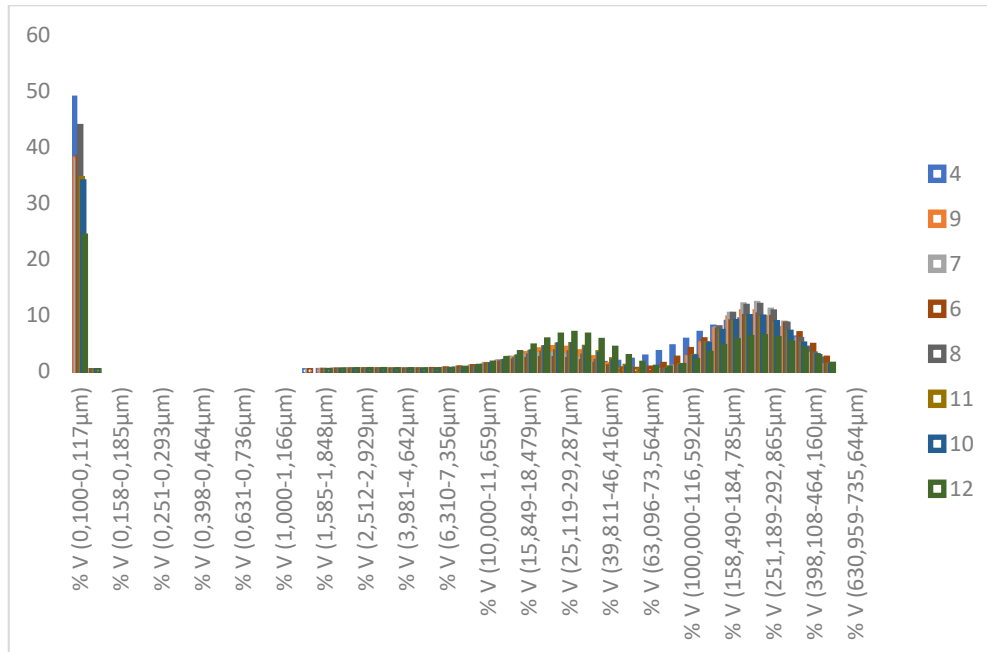


Graf 19 - Distribuční funkce měření 5

Měření 6

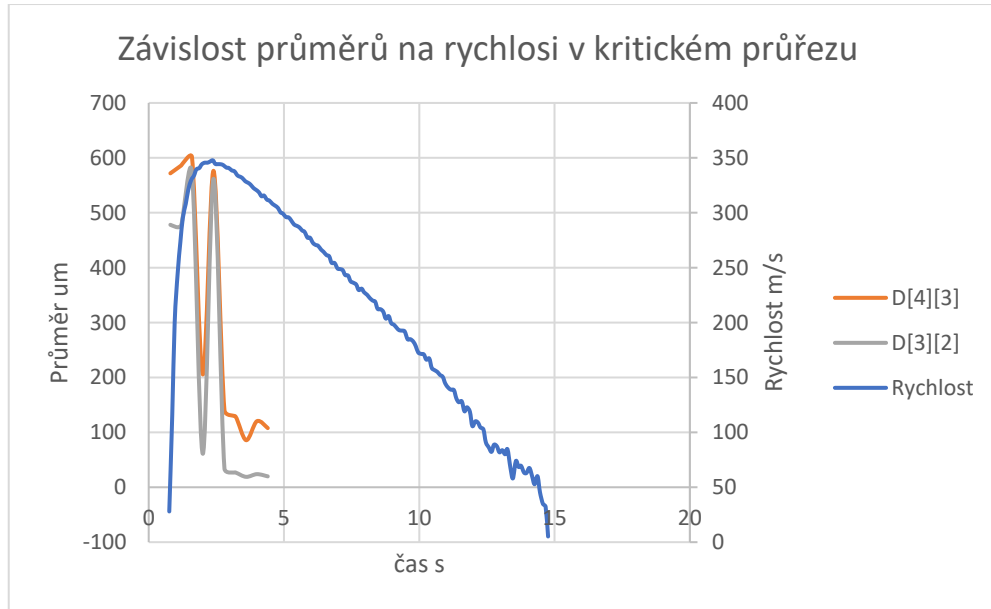


Graf 20 - Průměry v závislosti na rychlosti měření 6

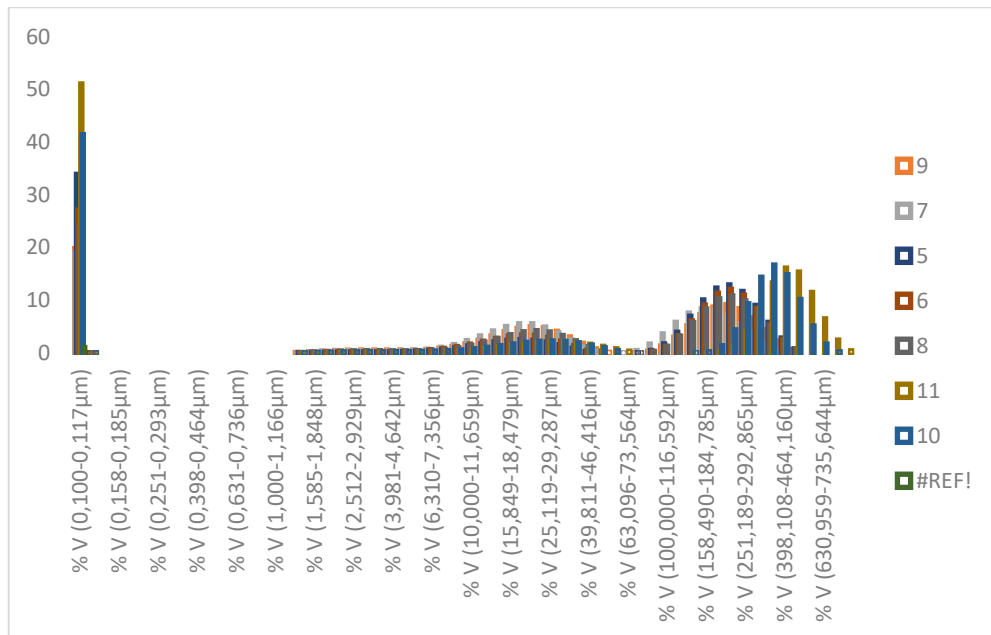


Graf 21 - Distribuční funkce měření 6

Měření 7



Graf 22 - Průměry v závislosti na rychlosti měření 7



Graf 23 - Distribuční funkce měření 7

8.4.2. Vyhodnocení měření - Malvern Spraytec

Z výsledků měření celkového tlaku a jeho následného přepočtu na rychlost v kritickém průřezu je patrné, že těsně po otevření přívodu tlaku ze vzdušníku kompresoru dojde ke skokovému nárůstu rychlosti. Rychlost pak během průběhu experimentu konstantně klesá.

Z výsledků měření na Malvern Spraytec je patrný trend, kdy průměry $D[3][2]$ a $D[4][3]$ jsou ze začátku konstantní, poté přijde velká skoková změna, která navazuje se zpožděním na výskyt peaku rychlosti proudění v kritickém průřezu. Po zbylou dobu měření se obě hodnoty $D[3][2]$ a $D[4][3]$ drží konstantního průběhu.

Z vyhodnocení distribuční funkce pro různé časové úseky (tj. i pro rozdílné tlaky a rychlosti proudění) je patrný shodný trend. První peak procentuálního zastoupení se nachází v oblasti hodno cca 16 μm . Jelikož výsledkem vyhodnocení Malvern Spraytec měření je objemové procento, je četnost zastoupení kapiček této frakce vysoká. Druhý peak se nachází v oblasti hodnot cca 233 μm . Zde se jedná již o kapičky s větším průměrem (tj. i objemem), a proto je jejich absolutní počet výrazně nižší než u kapiček z prvního peaku. Mezi oběma peaky se nachází mezera, ve které nedochází k výskytu skoro žádných kapiček.

Z výsledků je patrné, že naměřené hodnoty výskytu a velikosti kapiček přímo nezávisí na tlaku a rychlosti proudění. Z výsledků je patrné, že distribuce velikosti kapiček je nezávislá, případně jen velmi málo závislá na rychlosti proudění. Z toho usuzuji, že podobný profil distribuční funkce bude stejný pro většinu následujících měření.

Dalším významným zjištěním je fakt, že skutečná velikost detekovaných kapiček je řádově menší než předpokládaná velikost kapiček, která vychází z předpokladů uvedených v kapitole 4.

8.5. Měření kamera

S kamerou jsem provedl sadu měření se stejnými vstupními parametry, jako jsem použil pro měření se Malvern Spraytec. Nejprve jsem se pokusil udělat fotografie oblasti za profilem a zaměřit tak letící kapičky. Po neúspěchu této metody jsem se zaměřil na detekci kapiček v těsné blízkosti konce profilu, kterým je voda dávkována do proudu vzduchu.



Obrázek 58 - Snímek neúspěšného pokusu zachytit letící kapičky

Z obrázku 59 je patrné, že záchyt letících kapiček není možný. Z této fotografie a z výsledku měření na Malvern Spraytec jsem zjistil, že kapičky mají rozměry v řádech nižších desítek μm , což je na hranici rozlišovací schopnosti kamery. Proto jsem se v dalším měření zabýval hlavně fotografováním rozpadu filmu a atomizací kapiček v těsné blízkosti profilu.

8.5.1. Výsledky měření - kamera

Výsledné fotografie jsem vyhodnotil pomocí SW Matlab Computer vision toolbox. Nejdříve jsem fotku vyčistil a převedl do binárního³ zobrazení. Druhým krokem analýzy obrazu bylo stanovení rozměrů hlavní a vedlejší osy detekovaných objektů a výpočet jejich plochy. Výsledné rozměry v pixelech jsem znásobil pomocí převodní konstanty stanovené v kapitole 8.2.2.2 a vyhodnotil jsem distribuční funkci.

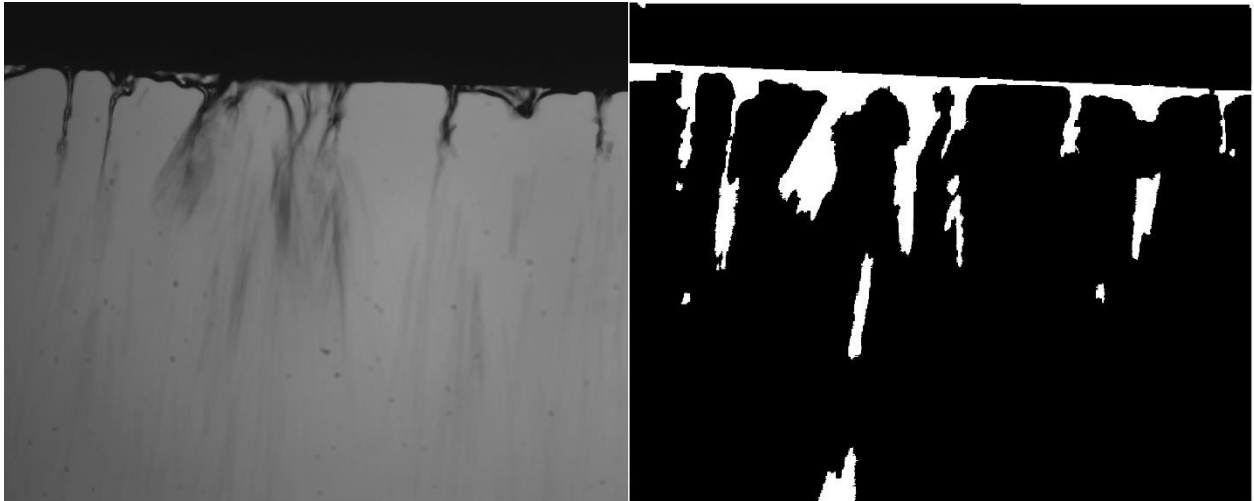
³ Binární zobrazení převede fotografii do 2 barevného schématu (černá a bílá). Takovouto fotografii je poté snazší dále analyzovat.

8.5.1.1. Vyhodnocení objemu tekutiny

Experiment 1

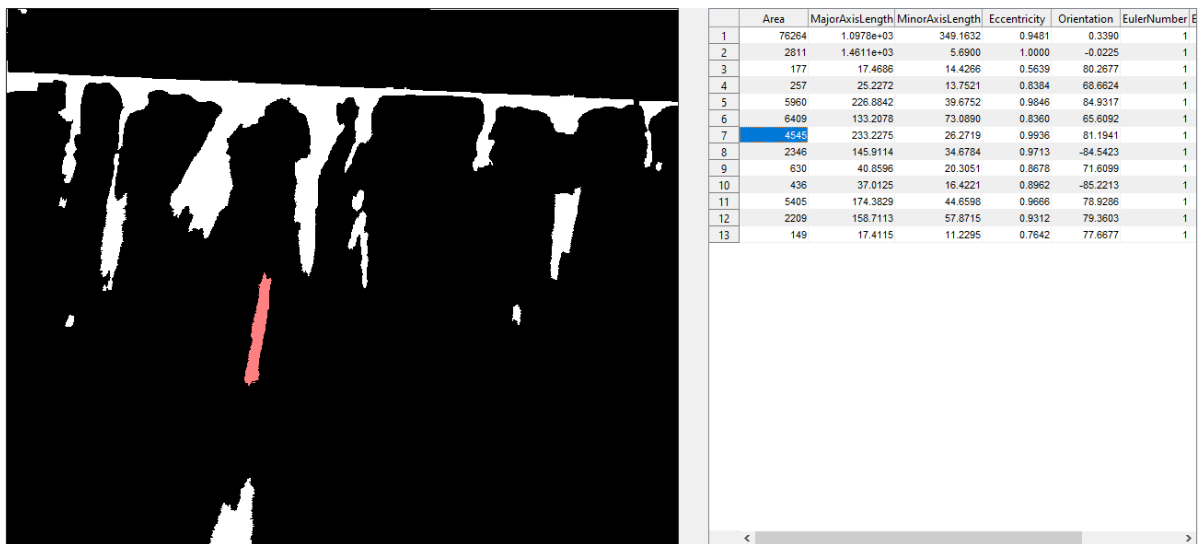
Parametry:

- Dioda 5
- Přetlak 0,1 MPa
- Průtok 5 ml/min



Obrázek 59 - Originální obraz a jeho Binární upravená verze experiment 1

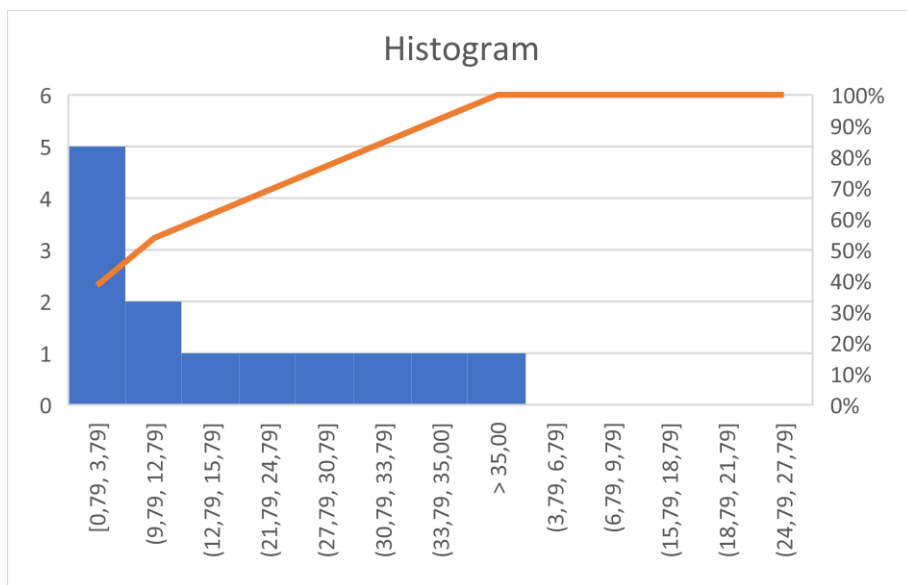
Dále jsem z obrazu nechal vyhodnotit rozměry objektů



Obrázek 60 - Automatická analýza rozměrů objektu experiment 1

Tabulka 14 - Rozměry jednotlivých útvarů experiment 1

Povrch (mm)	Hlavní osa (mm)	Vedlejší osa(mm)	Průměr (mm)	Obvod (mm)
406,49	5,85	1,86	1,66	29,49
14,98	7,79	0,03	0,32	13,29
0,94	0,09	0,08	0,08	0,35
1,37	0,13	0,07	0,10	0,41
31,77	1,21	0,21	0,46	4,32
34,16	0,71	0,39	0,48	3,06
24,22	1,24	0,14	0,41	3,06
12,50	0,78	0,18	0,29	2,24
3,36	0,22	0,11	0,15	0,62
2,32	0,20	0,09	0,13	0,62
28,81	0,93	0,24	0,44	2,71
11,77	0,85	0,31	0,28	2,18
0,79	0,09	0,06	0,07	0,25



Obrázek 61 - Histogram Velikost objektů

Z dostupných hodnot a z odhadované šířky filmu jsem stanovil přibližný odhad objemu vody zobrazené na fotografii. Objem vody jsem porovnal s dávkovaným množstvím vody na čerpadle a ověřil, zda alespoň přibližně odpovídá realitě.

Objem kapaliny na obrázku: 0,57 ml

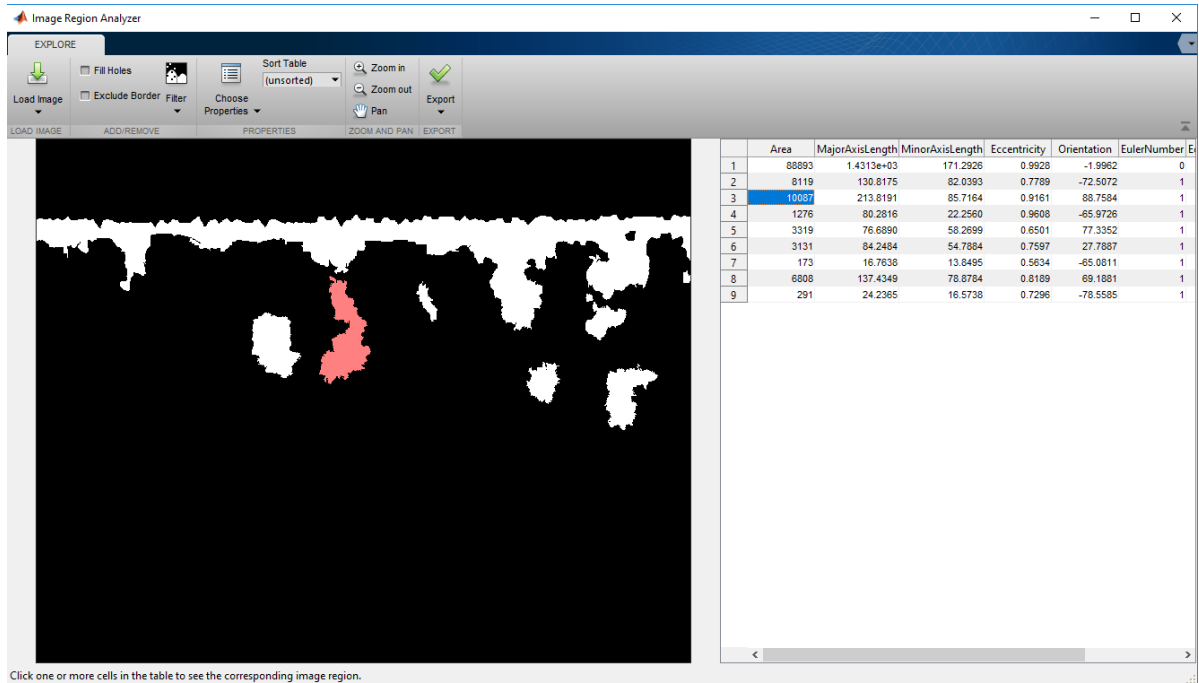
Tento objem odpovídá předpokladu.

Experiment 2

- Dioda 3
- Přetlak 0,16 MPa
- Průtok 5 ml/min



Obrázek 62 - Původní fotografie



Obrázek 63 - Automatická analýza rozměrů objektu experiment 2

Tabulka 15 - Rozměry jednotlivých útvarů experiment 2

Area	Hlavní osa	Vedlejší osa	Průměr	Obvod
473,80	7,63	0,91	1,79	25,03
43,27	0,70	0,44	0,54	2,61
53,76	1,14	0,46	0,60	4,78
6,80	0,43	0,12	0,21	1,23
17,69	0,41	0,31	0,35	2,09
16,69	0,45	0,29	0,34	1,75
0,92	0,09	0,07	0,08	0,27
36,29	0,73	0,42	0,50	3,39
1,55	0,13	0,09	0,10	0,41

Objem kapaliny na obrázku: 0,63 ml

Tento objem odpovídá předpokladu.

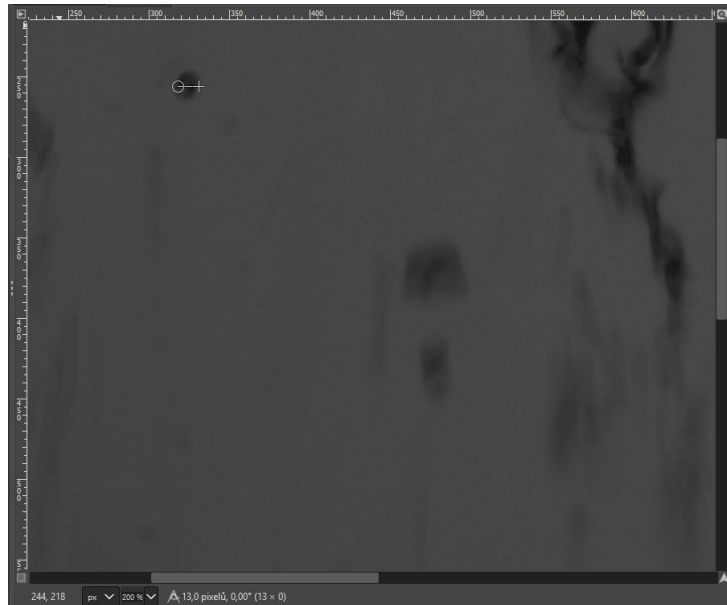
8.5.1.2. Závěr - vyhodnocení objemu tekutiny

Z obrázků je patrné, že atomizované kapičky jsou tak malé a jejich automatizované rozpoznání a následné vyhodnocení v SW Matlab computer vision toolbox se jeví jako nemožné. Program totiž mluhu atomizovaných kapiček vyhodnotí jako jeden objekt, a tudíž je nemožné s jeho pomocí spočítat přesný počet a rozměry kapiček. Tento výsledek je překvapivý, protože z optického vyhodnocení je patrné, že rozměry kapiček jsou menší, než bylo předpokládáno.

V dalším kroku jsem použil program GIMP, díky kterému jsem mohl přesně určit rozměry a délky trajektorií a zaměřil jsem se na určení Weberova čísla.

8.5.1.3. Určení Weberova čísla

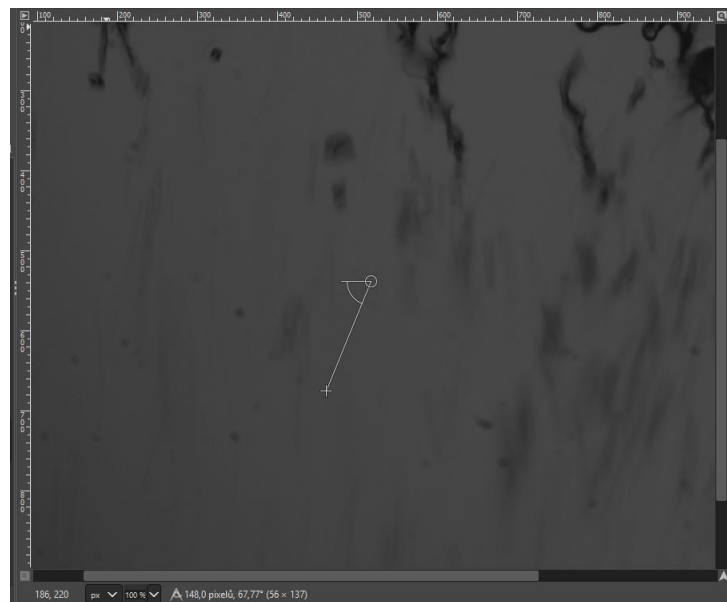
Provedl jsem manuální analýzu obrazu, při které jsem si znovu potvrdil, že kapičky atomizují do menších rozměrů, než jsem původně předpokládal. V tomto případě kapička o velikosti 65 μm je zdaleka největším objektem na obrázku 65.



Obrázek 64 - Největší kapička v celém snímku 13 px

Dále jsem určil rychlost drobné frakce, která je na rozlišovací schopnosti kamery. Tuto rychlost jsem určil ze znalosti doby a délky trajektorie. Kde vím, že tento snímek byl pořízen na diodu na stupnici 3 tzn. 13,42 μ s.

Měření 1



Obrázek 65 - Trajektorie letící kapičky měření 1

Rychlost kapičky:

$$v = \frac{s}{t} = 148 * \frac{5,3}{13,42} = 58,45 \text{ m/s}$$

Tabulka 16 - Odhadované rychlosti v kritickém průřezu

přetlak	1,6	Mpa
Skutečný tlak	258,698	kPa
kappa	1,4	
rychlost	1,258855	Ma
rychlost	428,0107	m/s

Stanovení Weberova čísla - Konstanty:

$$\rho'' = 1,2047 \frac{kg}{m^3}$$

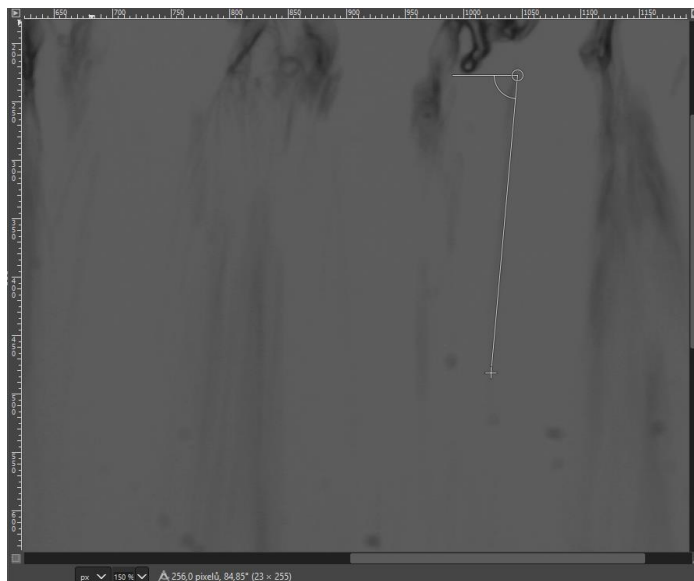
$$\sigma = 0,07275 \frac{N}{m}$$

Stanovení Weberova čísla - Výpočet:

$$W_e = \frac{W_r^2 * \rho'' D}{\sigma}$$

$$W_e = 12,1$$

Měření 2



Obrázek 66 - Trajektorie letící kapičky měření 2

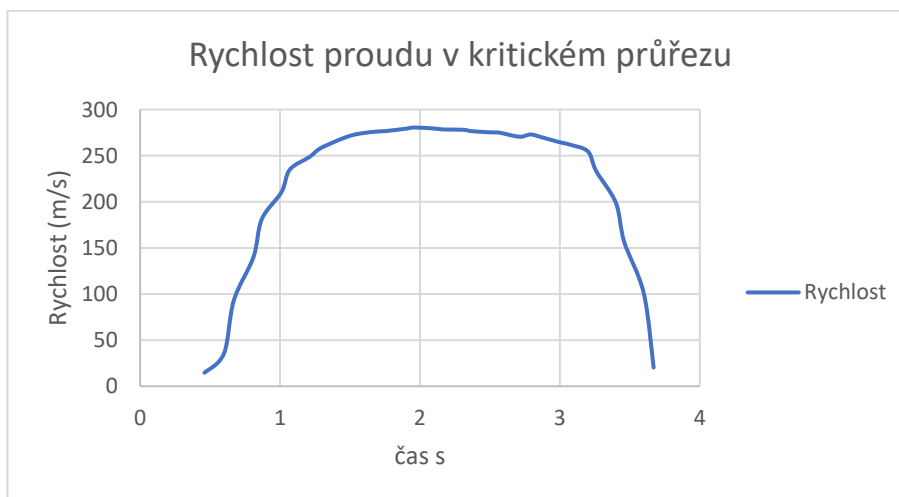
Rychlost kapičky:

$$v = \frac{s}{t} = 256 * \frac{10,6}{17,6} = 77,1 \text{ m/s}$$

Naměřený průměr:

$$D = 2px = 10,6\mu\text{m}$$

Rychlostní profil:



Graf 24 - Rychlost měření 2

Stanovení Weberova čísla – Výpočet:

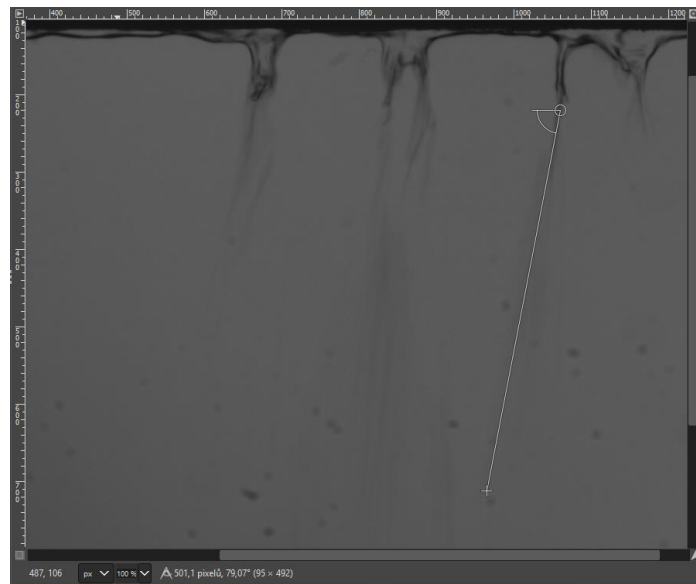
$$W_e = 6,6$$

Předpokládané hodnoty dle kapitoly 4. a 8.1

$$D = 62,5$$

$$W_e = 38$$

Měření 3



Obrázek 67 - Trajektorie letící kapičky měření 3

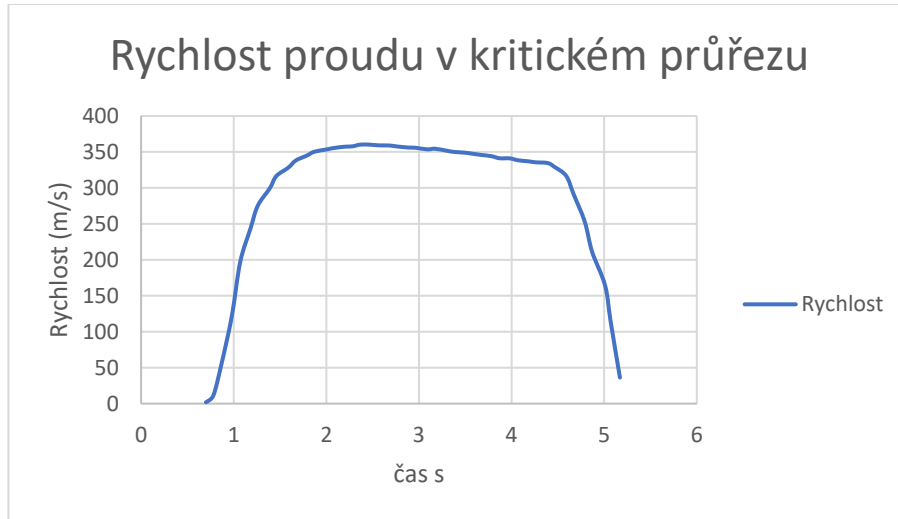
Rychlost kapičky:

$$v = \frac{s}{t} = 501 * \frac{5,3}{17,6} = 150,9 \text{ m/s}$$

Naměřený průměr:

$$D = 8px = 42,4\mu m$$

Rychlostní profil:



Graf 25 - Rychlost měření 3

Stanovení Weberova čísla – Výpočet:

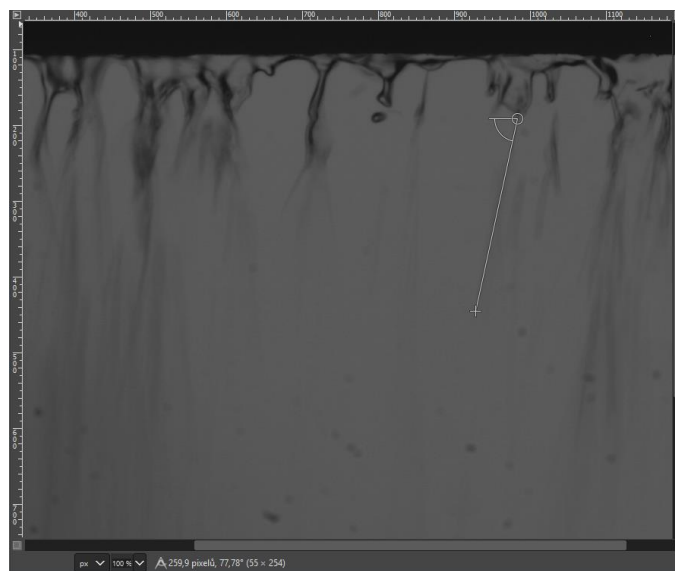
$$W_e = 26$$

Předpokládané hodnoty dle kapitoly 4. a 8.1

$$D = 120 \mu m$$

$$W_e = 42$$

Měření 4



Obrázek 68 - Trajektorie letící kapičky měření 4

Rychlost kapičky:

$$v = \frac{s}{t} = 260 * \frac{5,3}{17,6} = 78,3 \text{ m/s}$$

Naměřený průměr:

$$D = 2px = 10,6 \mu\text{m}$$

Rychlostní profil:



Graf 26 - Rychlost měření 4

Stanovení Weberova čísla – Výpočet:

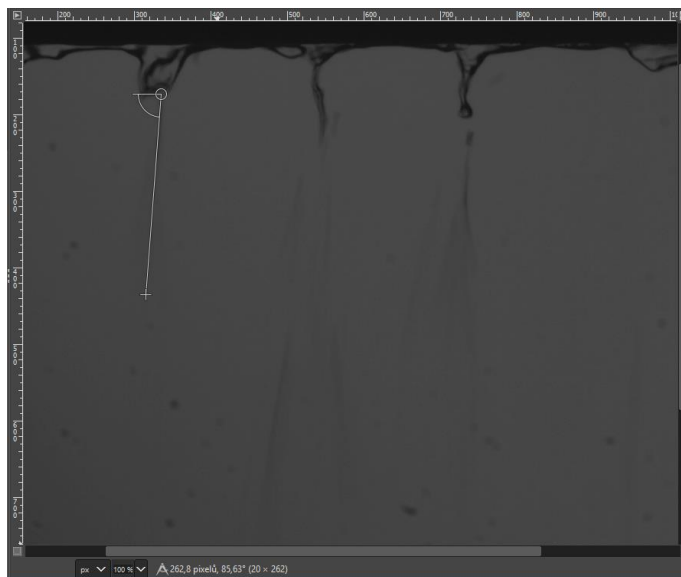
$$W_e = 12,4$$

Předpokládané hodnoty dle kapitoly 4. a 8.1

$$D = 38 \mu\text{m}$$

$$W_e = 48$$

Měření 5



Obrázek 69 - Trajektorie letící kapičky měření 5

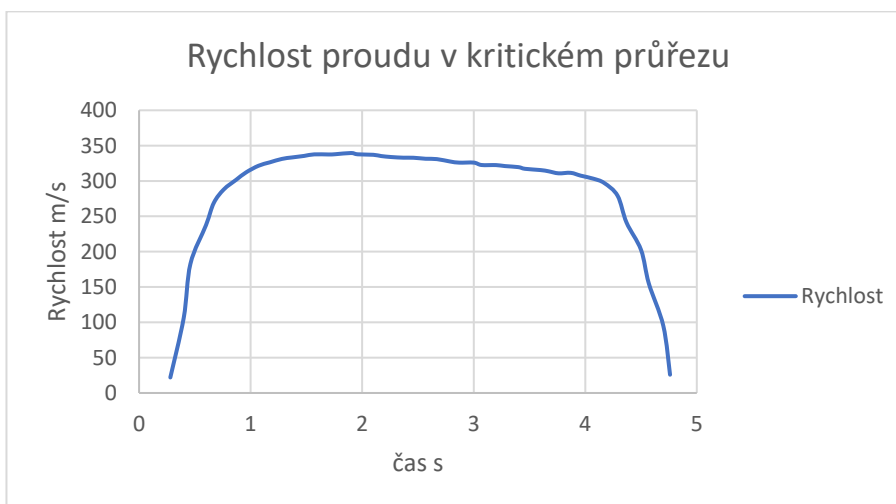
Rychlost kapičky:

$$v = \frac{s}{t} = 262 * \frac{5,3}{13,3} = 104,6 \text{ m/s}$$

Naměřený průměr:

$$D = 3px = 15,9 \mu m$$

Rychlostní profil:



Graf 27 - Rychlost měření 5

Stanovení Weberova čísla – Výpočet:

$$W_e = 15,2$$

Předpokládané hodnoty dle kapitoly 4. a 8.1

$$D = 38 \mu m$$

$$W_e = 43$$

Měření 6



Obrázek 70 - Trajektorie letící kapičky měření 6

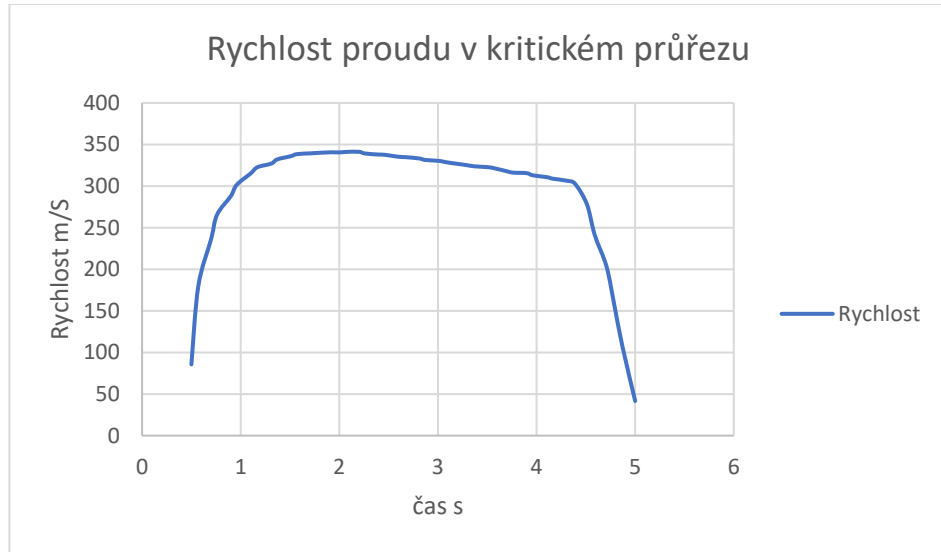
Rychlost kapičky:

$$v = \frac{s}{t} = 407 * \frac{5,3}{13,3} = 162,2 \text{ m/s}$$

Naměřený průměr:

$$D = 2px = 10,6 \mu m$$

Rychlostní profil:



Graf 28 - Rychlost měření 6

Stanovení Weberova čísla – Výpočet:

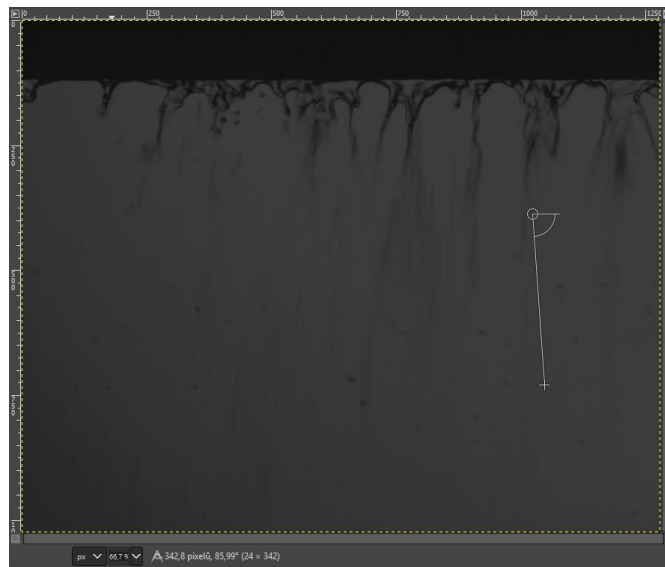
$$W_e = 5,9$$

Předpokládané hodnoty dle kapitoly 4. a 8.1

$$D = 70 \mu\text{m}$$

$$W_e = 41$$

Měření 7



Obrázek 71 - Trajektorie letící kapičky měření 7

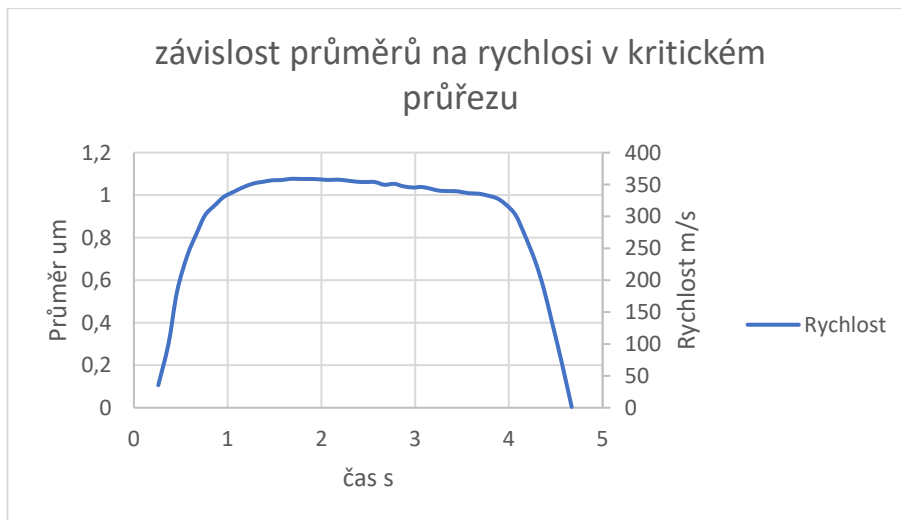
Rychlost kapičky:

$$v = \frac{s}{t} = 362 * \frac{5,3}{9,2} = 208 \text{ m/s}$$

Naměřený průměr:

$$D = 4px = 26,5 \text{ } \mu\text{m}$$

Rychlostní profil:



Graf 29 - Rychlost měření 7

Stanovení Weberova čísla – Výpočet:

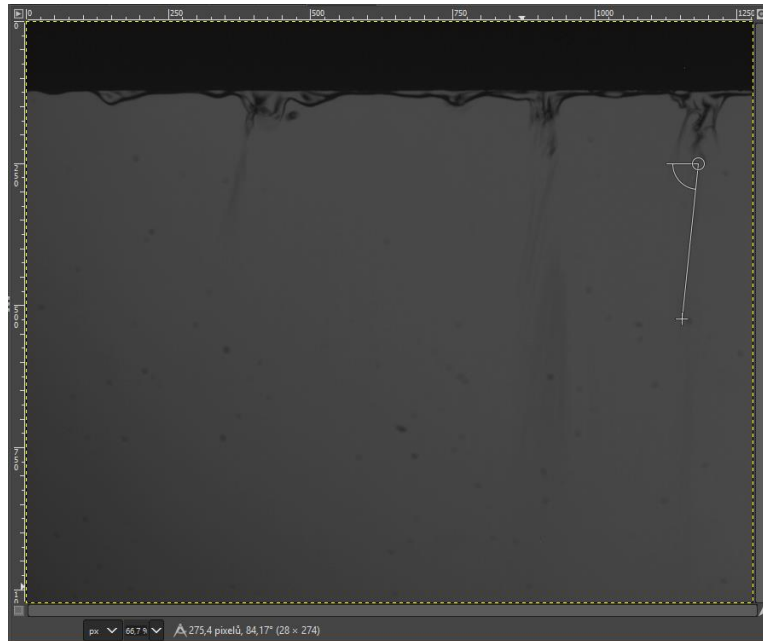
$$W_e = 8,5$$

Předpokládané hodnoty dle kapitoly 4. a 8.1

$$D = 110 \text{ } \mu\text{m}$$

$$W_e = 41$$

Měření 8



Obrázek 72 - Trajektorie letící kapičky měření 8

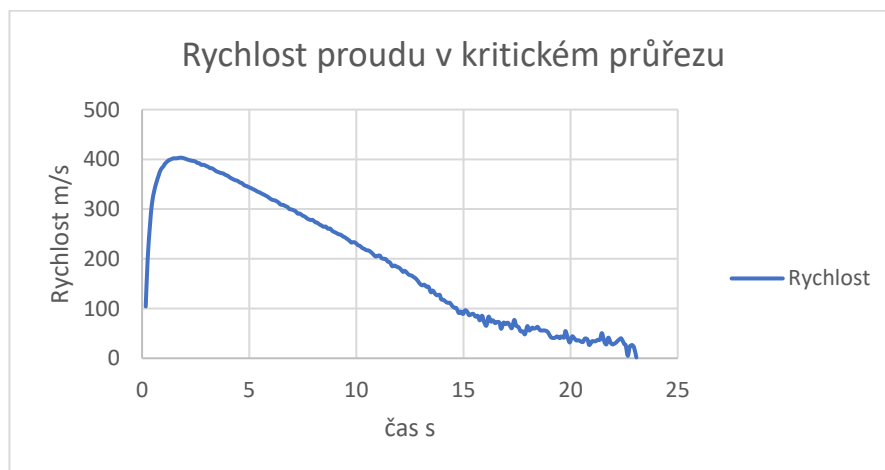
Rychlost kapičky:

$$v = \frac{s}{t} = 275 * \frac{5,3}{13,3} = 109 \text{ m/s}$$

Naměřený průměr:

$$D = 4px = 21,2 \text{ } \mu\text{m}$$

Rychlostní profil:



Graf 30 - Rychlost měření 8

Stanovení Weberova čísla – Výpočet:

$$W_e = 28,5$$

Předpokládané hodnoty dle kapitoly 4. a 8.1

$$D = 23 \mu m$$

$$W_e = 37$$

8.5.2. Vyhodnocení měření - kamera

Jak již bylo zmíněno výše, snímky pro určování Weberova čísla nepřinesly očekávané výsledky. Mnou získaná data ukazují existenci atomizovaných kapiček, které jsou násobně menší než kapičky, které jsem předpovídal v tabulce v kapitole 8.1. Z výsledku je patrné, že mnou detekované kapičky mají, menší průměrné Weberovo číslo, než se předpokládalo.

Tyto výsledky celý experiment s kamerou posouvají do jiné roviny, než bylo původně zamýšleno. Atomizované kapičky jsou svou velikostí na samé hraně rozlišovací schopnosti kamery. Tato metoda je pro jejich detekci a vyhodnocení značně nevhodná. Metoda měření kamerou se však výborně hodí pro zachycování snímků rozpadajících se vodních filmů na samotné hraně profilu. Tato metoda nám přináší detailní obrazové informace o průběhu rozpadu a atomizace tohoto vodního filmu.

Ze záběrů jsem také určil odhadované množství vody ve filmu a porovnal jsem ho s dávkovaným množstvím. Zjistil jsem, že toto množství souhlasí.

9. Návrh dalších experimentů

Celá měřicí trať má velký potenciál pro budoucí experimenty a může přinést zajímavé výsledky v oblasti výzkumu nukleace a atomizace vodních kapiček. Prvním krokem ke zlepšení výsledků, které experimenty poskytují, by mělo být proměření a popis chování proudu vzduchu po celém průběhu dýzy včetně oblasti kolem injektážního profilu. Na základě těchto znalostí by bylo vhodné stanovit výpočtový model a jeho pravdivost ověřit pomocí odběrů statického tlaku. Tato úprava však nebude triviální z důvodu komplikovaného chování proudění v okolí profilu pro injektáž vody.

Dalším experimentem, na který je dýza již nyní technicky připravena a bude možné ho snadno v budoucnu realizovat, je měření, při kterém bude použita pára z kotle namísto tlakového vzduchu. Jedinou nutnou úpravou je tepelné zaizolování měřící trati. Měření s párou povede k výsledkům, které budou díky shodnému mediu mnohem blíže reálným podmínkám v turbíně.

Hlavním přínosem mé práce je zjištění, že atomizované kapičky v proudu vzduchu jsou násobně menší, než se očekávalo. V dalších experimentech bude nutné zaměřit se na zlepšení rozlišovacích schopností kamery při jejich záchytu fotogrammetrickou metodou. Zlepšení je možné provést výměnou objektivu nebo použitím celé nové kamery.

Další způsob, který posune získaná data k vyšší přesnosti je rozdělení jemné a hrubé vodní disperze a její vyhodnocení zvlášť. Tento jev je patrný zejména na distribuční funkci měření Malvern Spraytec, kde jsou patrné dva peaky. Vyhodnocení měření na Malvern Spraytec nám poskytuje souhrnné rozměry $D[3][2]$ a $D[4][3]$, avšak pro větší přesnost by bylo zajímavé tyto rozměry stanovit zvlášť pro jednotlivé skupiny kapiček (hrubou a jemnou disperzi)

Další možností je změnit měřicí instrumentaci a měřit jiné parametry proudícího vzduchu/páry. Nejjednodušším způsobem, jak změny parametrů docílit, je přidat aditivum do dávkované vody a tím změnit její povrchové napětí. Dalším krokem může být i expanze media do jiných než atmosférických parametrů.

10. Závěr a shrnutí

Z provedené rešerše jsem došel k poznání, že navržená měřící trať obsahující profil pro injektáž vody do proudu plynu bude unikátní a bude mít potenciál přinést zajímavé výsledky. Během dílčích experimentů jsem potvrdil platnost fotogrammetrické metody jako metody dostatečně přesné pro analýzu polydisperzních systémů ze snímků fotografie. Avšak v pozdějších experimentech na měřící trati jsem od této metody musel upustit, protože platnost tohoto tvrzení je pouze v případě, že analyzované objekty mají dostatečnou velikost, aby je bylo možné z fotografie vyhodnotit.

V rámci mé práce vznikla v laboratořích na Julisce celá měřící trať, která je nyní v provozu a je na ní možno provozovat experimenty s použitím tlakového vzduchu. V rámci ověření základních vlastností dýzy a základních předpokladů o chování kapiček v proudu urychleného vzduchu uvnitř dýzy.

Z výsledků provedených experimentů na měřící trati je patrné, že distribuce kapiček je nezávislá na rychlosti proudění. Naměřená data můžeme použít jako základ pro další experimenty. Dalším dílčím zjištěním z analýzy dat, která mi poskytl Malvern Spraytec jsem zjistil, že v proudu atomizovaných kapiček se vyskytují dvě skupiny, a to jemná vodní disperze a hrubá vodní disperze. Já jsem ve svých vyhodnoceních pracoval s vodní disperzí jako celkem, ale pro další experimenty by bylo vhodné manuálně tyto dvě skupiny pro vyhodnocení oddělit a tím získat i větší přesnost výsledků.

Největším přínosem této práce je zjištění, že kapičky atomizují na menší rozměry, než se předpokládalo, a proto v dalších experimentech s použitím fotogrammetrické metody bude nutné s tímto faktem počítat a použít zařízení (kameru a objektiv), která jsou schopna detekovat i takto malé objekty.

11.Zdroje

- [1] BARTOŠ, Ondřej. Study of an Electrostatic Charge of Water Droplets within the Expansion in the Laval Nozzle. b.r., , 6.
- [2] PANDEY, Anshuman. Numerical Modelling of Non-Equilibrium Condensing Steam Flows. 2014.
- [3] BARSCHDORFF, Dieter. Verlauf der Zustandsgrößen und *gasdynamische Zusammenhänge* bei der spontanen Kondensation reinen Wasserdampfes in Lavaldüsen. *Forschung im Ingenieurwesen A*. Springer, 1971, **37**(5), 146-157. ISSN 00157899.
- [4] Heat and fluid flow in steam and gas turbine plant: a conference. 1. London: Institution of Mechanical Engineers, 1974. Conference publication (Institution of Mechanical Engineers (Great Britain), 1973-3. ISBN 08-529-8199-6.
- [5] SCHNERR, GH a P LI. Shock wave/boundary layer interaction with heat addition by nonequilibrium phase transition. *International journal of multiphase flow*. Elsevier, 1993, 19(5), 737-749. ISSN 03019322.
- [6] SCHNERR, G. *2-D transonic flow with energy supply by homogeneous condensation: Onset condition and 2-D structure of steady Laval nozzle flow: Onset condition and 2-D structure of steady Laval nozzle flow*. *Experiments in Fluids*. Springer, 1988, **7**(3), 145-156. ISSN 07234864.
- [7] KLEITZ, A a JM DOREY. Instrumentation for wet steam. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. SAGE Publications Sage UK: London, England, 2004, **218**(8), 811-842. ISSN 09544062.
- [8] MASHMOUSHY, H, Mohammad MAHPEYKAR a F BAKHTAR. *Studies of nucleating and wet steam flows in two-dimensional cascades*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. SAGE Publications Sage UK: London, England, 2004, **218**(8), 843-858. ISSN 09544062.

- [9] EVANS, RO, WN DAWES a Q ZHANG. Proceedings of ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition GT2013 June 3-7, 2013, San Antonio, Texas, USA: *Turbine Technical Conference and Exposition GT2013 June 3-7, 2013, San Antonio, Texas, USA*. 2013.
- [10] MCFARLAND, Jacob. *Conceptual Design and Instrumentation Study For a 2-D, Linear, Wet Steam Turbine Cascade Facility*. 2008.
- [11] WU, Xin-Zhuang, Jun-Jie YAN, Shu-Feng SHAO, Yan CAO a Ji-Ping LIU. Experimental study on the condensation of supersonic steam jet submerged in quiescent subcooled water: steam plume shape and heat transfer: steam plume shape and heat transfer. *International Journal of Multiphase Flow*. Elsevier, 2007, **33**(12), 1296-1307. ISSN 03019322.
- [12] LIANG, Kuo-Shing. Experimental and analytical study of direct contact condensation of steam in water. *Nuclear Engineering and Design*. Elsevier, 1994, 147(3), 425-435. ISSN 00295493.
- [13] PROUDĚNÍ MOKRÉ PÁRY A JEJÍ EROZIVNÍ ÚČINKY V PRŮTOČNÉ ČÁSTI PARNÍ TURBÍNY. První. Praha: sborník referátů *seminář Praha*, 1978.
- [14] *Aerodynamické profily*. Airfoiltools [online]. b.r. [cit. 2018-06-01]. Dostupné z: <http://airfoiltools.com>
- [15] *Omega* [online]. b.r. [cit. 2018-02-06]. Dostupné z: <https://www.omegaeng.cz/pptst/PXM309.html>
- [16] *Measurement Computing Data Acquisition Knowledgebase*. <Http://kb.mccdaq.com/KnowledgebaseArticle50045.aspx> [online]. b.r. [cit. 2018-02-06]. Dostupné z: <http://kb.mccdaq.com>
- [17] DI STEFANO, C, V FERRO a S MIRABILE. Comparison between grain-size analyses using laser diffraction and sedimentation methods. *Biosystems Engineering*. Elsevier, 2010, **106**(2), 205-215. ISSN 15375110.

- [18] ZAHÁLKA, PRÁCE a Rostislav DROCHYTKA. FAKULTA STAVEBNÍ ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ. b.r.
- [19] PLAS, L. Preliminary note on the granulometric analysis of sedimentary rocks. *Sedimentology*. Wiley Online Library, 1962, **1**(2), 145-157. ISSN 13653091.
- [20] *Granulometrie - síťová analýza materiálu keramzit*. Energetika - ČVUT [online]. Praha: ČVUT, 2015 [cit. 2017-08-02]. Dostupné z: http://energetika.cvut.cz/files/A_granulometrie.pdf
- [21] WEN, Baoping, Adnan AYDIN a Nurdan DUZGOREN-AYDIN. A comparative study of particle size analyses by sieve-hydrometer and laser diffraction methods. ASTM International, 2002. ISSN 01496115.
- [22] *Particle Size Measurement*. Čtvrté. Hong Kong: Springer Verlag, 2012. ISBN 978-940-1066-730.
- [23] SYVITSKI, James. Principles, methods and application of particle size analysis. Cambridge University Press, 2007. ISBN 0521044618.
- [24] LU, Ning, Gerald RISTOW a William LIKOS. The accuracy of hydrometer analysis for fine-grained clay particles. ASTM International, 2000. ISSN 01496115.
- [25] *Soil Texture, Particle Size Distribution and Soil Classification*. Soil Texture [online]. b.r. [cit. 2017-08-02]. Dostupné z: <http://slideplayer.com/slide/5192972/>
- [26] DE BOER, Gerben, Cornelis DE WEERD, Dirk THOENES a Hendrik GOOSSENS. Laser diffraction spectrometry: Fraunhofer diffraction versus Mie scattering: Fraunhofer diffraction versus Mie scattering. *Particle & Particle Systems Characterization*. Wiley Online Library, 1987, **4**(14), 14-19. ISSN 15214117.
- [27] *Particle Size Distribution Calculation Method* [online]. 2017 [cit. 2017-08-02]. Dostupné z: <http://www.shimadzu.com/an/powder/support/practice/p01/lesson22.html>
- [28] SPRAYTEC. Worcestershire UK, 2016. Dostupné také z: <https://www.malvern.com/en/products/product-range/spraytec>

[29] *Fotodioda OSRAM. TME [online]. b.r. [cit. 2018-06-03]. Dostupné z: https://www.tme.eu/cz/details/sfh203/fotodiody/osram/sfh-203/?brutto=1&gclid=Cj0KCQjwgMnYBRDRARIsANC2dfIVSz_dy-P638OtjNt8tSQFb6uxahQQ_OfJnyDARKzqzT2bqWrLnl4aAuUSEALw_wcB*

12. Seznam obrázků

<i>Obrázek 1 - Schéma zapojení měřící trati dýzy Juliska Zdroj: (1)</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 2 - Schéma měřící trati Barschdorfovy dýzy Zdroj: (3).....</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 3 - Detail Barschdorfy dýzy Zdroj: (3).....</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 4 - Detail rozměrů Barschdorfovy dýzy Zdroj: (3)</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 5 - Schéma měřící trati T. Ikeda, A. Suzuki dýzy Zdroj: (4)</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 6 - Schéma měřící trati M. J. Moore P. T. Waltera R. I. Crane B. J. Davidson dýzy Zdroj: (4).....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 7 - Možné parametry M. J. Moore P. T. Waltera R. I. Crane B. J. Davidson dýzy Zdroj: (4)</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 8 - Schéma Gyarmathy dýzy Zdroj: (4).....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 9 - Schéma průtoku Schnerrovou dýzou Zdroj: (6).....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 10 - Řez turbínou upravenou pro odběry Zdroj: (7)</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 11 - Způsob odběru páry Zdroj: (7)</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 12 - Schéma měřící trasy Doorey dýzy + místa odběru Zdroj: (7)</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 13 - Schéma + foto dýzové sekce Bakhtar Zdroj: (8).....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 14 - Schéma měřící trati Bakhtar dýzy Zdroj: (8)</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 15 - Obrázky reálného experimentu Zdroj: (8).....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 16 - Schéma trati pro výpočet pomocí CFD Zdroj: (9)</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 17 - Detail proudění skrz Evans, Dawes, Zhang dýzu Zdroj: (9)</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 18 - Schéma měřící trati Wet Steam Turbine Cascade Facility – Jacob Andrew Zdroj: (10).....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 19 - Schéma experimentu s expanzí do vodní lázně Zdroj: (11).....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 20 - Schéma měřící trati pro experimenty SVUSS Zdroj: (13).....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 21 - Rozložení rychlosti v úplavu za obtékaným symetrickým profilem pro $We=6$ Zdroj: (13)</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 22 - Závislost Weberova čísla na stabilním rozměru kapky I-40m/s, II-80m/s Zdroj: (13).....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 23 - Weberovo číslo stanovená v závislosti na rychlosti okolního proudu Zdroj: (13)</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 24 - Dýza základní parametry - náčrt</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 25 - Dýza umístění otvorů pro měřící instrumentaci</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 26 - Profil NACA 0008 Zdroj: (14).....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 27 - Detail hlavních dílů měřící trati</i>	<i>32</i>

Obrázek 28 - Průhledítka (kupované)	33
Obrázek 29 - Dýza	33
Obrázek 30 - Cyklonový separátor	33
Obrázek 31 - Redukce	34
Obrázek 32 - Rozložení měřící trati vč. výfukového potrubí	34
Obrázek 33 - National instruments SCXI 1000 v prostorách laboratoře Juliska	35
Obrázek 34 - Schéma sestavy (kamera - dýza - LED dioda)	36
Obrázek 35 - Dýza s červeně vyznačenými místy pro odběr tlaku	37
Obrázek 36 - Tlakový snímač Omega PXM309 Zdroj: (15)	37
Obrázek 37 - Schéma termočlánku typu T Zdroj: (16)	38
Obrázek 38 - Schéma instrumentace - složitá varianta	39
Obrázek 39 - Schéma instrumentace - jednoduchá varianta	40
Obrázek 40 - Výsledná sestava trati pohled 1	41
Obrázek 41 - Výsledná sestava trati pohled 2	41
Obrázek 42 - Detail měření tlaku	42
Obrázek 43 - Detail odběr tlaku	42
Obrázek 44 - Detail cyklonový separátor vody	43
Obrázek 45 - Měření s přístrojem Malvern Spraytec	43
Obrázek 46 - Kompresorová stanice - zdroj stlačeného vzduchu	44
Obrázek 47 - Schéma síťové analýzy + křivka rozsevu Zdroj: (20)	47
Obrázek 49 - Hydrometrická metoda Zdroj: (25)	49
Obrázek 50 - Zařízení pro měření pomocí laserové difrakční metody Zdroj: (27)	50
Obrázek 51 – Malvern Spraytec Zdroj: (28)	51
Obrázek 52 - Porovnání správně naneseného vzorku bez shluků (vpravo) a špatně naneseného vzorku se shluky (vlevo)	52
Obrázek 53 - Vysoký počet nerelevantních částic (červeně) relevantní částice (modře)	53
Obrázek 54 - Segmentovaný obraz + manuální analýza rozměru	54
Obrázek 55 - Foto 1. vzorku z 3 síta	61
Obrázek 56 - Kalibrace kamery v SW GIMP	66
Obrázek 57 - Měření doby záblesku pomocí osciloskopu	67
Obrázek 58 - Fotodioda OSRAM Zdroj: (29)	67
Obrázek 59 - Snímek neúspěšného pokusu zachytit letící kapičky	79
Obrázek 60 - Originální obraz a jeho Binární upravená verze experiment 1	80
Obrázek 61 - Automatická analýza rozměrů objektu experiment 1	80
Obrázek 62 - Histogram Velikost objektů	81

<i>Obrázek 63 - Původní fotografie</i>	82
<i>Obrázek 64 - Automatická analýza rozměrů objektu experiment 2</i>	82
<i>Obrázek 65 - Největší kapička v celém snímku 13 px</i>	84
<i>Obrázek 66 - Trajektorie letící kapičky měření 1</i>	84
<i>Obrázek 67 - Trajektorie letící kapičky měření 2</i>	86
<i>Obrázek 68 - Trajektorie letící kapičky měření 3</i>	87
<i>Obrázek 69 - Trajektorie letící kapičky měření 4</i>	88
<i>Obrázek 70 - Trajektorie letící kapičky měření 5</i>	90
<i>Obrázek 71 - Trajektorie letící kapičky měření 6</i>	91
<i>Obrázek 72 - Trajektorie letící kapičky měření 7</i>	92
<i>Obrázek 73 - Trajektorie letící kapičky měření 8</i>	94

13. Seznam tabulek

Tabulka 1 - Parametry Gyarmathy dýzy (4).....	18
Tabulka 2 - Parametry pokusu Bakhtar Zdroj: (8).....	20
Tabulka 3 - Parametry pokusu Evans, Dawes, Zhang Zdroj: (9).....	21
Tabulka 4 - Parametry pokusu Wet steam turbine cascade facility Zdroj: (10).....	23
Tabulka 5 - Výstupy termočlánku typu T Zdroj: (16).....	38
Tabulka 6 - Technické specifikace (zkráceno) Zdroj: (28).....	51
Tabulka 7 - Výsledky automatického měření.....	55
Tabulka 8 - Výsledky granulometrie	57
Tabulka 9 - Očekávané průměry kapiček stanovené dle experimentu SVUSS	62
Tabulka 10 - Naměřené výstupní signály, přepočtené tlaky a odchylky	64
Tabulka 11 - Koeficienty pro přepočet	65
Tabulka 12 - Kalibrace - záblesk diody.....	68
Tabulka 13 - Tabulka parametrů – Kritické parametry.....	69
Tabulka 14 - Rozměry jednotlivých útvarů experiment 1.....	81
Tabulka 15 - Rozměry jednotlivých útvarů experiment 2.....	83
Tabulka 16 - Odhadované rychlosti v kritickém průřezu	85

14. Seznam grafů

Graf 1- Křivka propadu a křivka četnosti Zdroj: (20).....	48
Graf 2 - Propad a rozsev	58
Graf 3 - Četnost.....	59
Graf 4 - Histogram celkový	60
Graf 5 - Histogram síto 3	60
Graf 6 - Závislost velikosti kapičky na její relativní rychlosti.....	62
Graf 7 - Kalibrace tlakových snímačů	65
Graf 8 - Doba záblesku.....	68
Graf 9 - Závislost rychlosti proudění skrz kritický průřez na čase	70
Graf 10 - Průměry v závislosti na rychlosti měření 1.....	71
Graf 11 - Distribuční funkce měření 1	71
Graf 12 - Průměry v závislosti na rychlosti měření 2.....	72
Graf 13 - Distribuční funkce měření 2	72
Graf 14 - Průměry v závislosti na rychlosti měření 3.....	73
Graf 15 - Distribuční funkce měření 3	73

<i>Graf 16 - Průměry v závislosti na rychlosti měření 4.....</i>	<i>74</i>
<i>Graf 17 - Distribuční funkce měření 4.....</i>	<i>74</i>
<i>Graf 18 - Průměry v závislosti na rychlosti měření 5.....</i>	<i>75</i>
<i>Graf 19 - Distribuční funkce měření 5.....</i>	<i>75</i>
<i>Graf 20 - Průměry v závislosti na rychlosti měření 6.....</i>	<i>76</i>
<i>Graf 21 - Distribuční funkce měření 6.....</i>	<i>76</i>
<i>Graf 22 - Průměry v závislosti na rychlosti měření 7.....</i>	<i>77</i>
<i>Graf 23 - Distribuční funkce měření 7.....</i>	<i>77</i>
<i>Graf 24 - Rychlost měření 2.....</i>	<i>86</i>
<i>Graf 25 - Rychlost měření 3.....</i>	<i>88</i>
<i>Graf 26 - Rychlost měření 4.....</i>	<i>89</i>
<i>Graf 27 - Rychlost měření 5.....</i>	<i>90</i>
<i>Graf 28 - Rychlost měření 6.....</i>	<i>92</i>
<i>Graf 29 - Rychlost měření 7.....</i>	<i>93</i>
<i>Graf 30 - Rychlost měření 8.....</i>	<i>94</i>