

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2022

**ADAM
HUNĚK**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Huněk** Jméno: **Adam** Osobní číslo: **474816**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Energetika a procesní inženýrství**
Specializace: **Energetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh inovované trati pro laboratorní měření hrubé vodní disperze

Název diplomové práce anglicky:

A design of a novel nozzle for the measurement of the coarse droplets

Pokyny pro vypracování:

Eroze posledních stupňů parních turbín v důsledku přítomnosti kapalně fáze v proudu páry je téma, které si stále zaslouží pozornost. Pro zlepšení spolehlivosti a životnosti parních turbín je nezbytné znát co nejlépe strukturu kapalně fáze, tak aby bylo možné přijmout odpovídající opatření ke snížení opotřebení oběžných lopatek. Zvláště pro erozi nejpodstatnější je znalost rozměrové distribuce hrubé vodní disperze. Vznik hrubé vodní disperze je vázán s aerodynamickým rozpadem vodních filmů na rozváděcích lopatkách parních turbín. Práce je zaměřena na inovování stávající měřicí trati umístěné v laboratoři Na Julisce.

1. Rešerše stavu poznání o erozi v nízkotlakých dílech parních turbín.
2. Experimentální analýza výhod a nevýhod stávající měřicí trati.
3. Konstrukční návrh inovované průtočné části měřicí trati.
4. Zhodnocení a analýza výsledků měření na nové trati.

Seznam doporučené literatury:

Podle doporučení vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Ondřej Bartoš, Ph.D. ústav energetiky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **21.04.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **03.06.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2023**

Ing. Ondřej Bartoš, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci "Návrh inovované trati pro laboratorní měření hrubé vodní disperze" vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce Ing. Ondřeje Bartoše, Ph.D. a použil jsem pouze podklady uvedené v seznamu.

V Praze dne 3. června 2022

.....

Anotační list

- Jméno autora:** Bc. Adam Huněk
- Název DP:** Návrh inovované trati pro laboratorní měření hrubé vodní disperze
- Anglický název:** A design of novel nozzle for the measurement of the coarse droplets
- Akademický rok:** 2021/2022
- Ústav/Odbor:** Ústav energetiky
- Vedoucí BP:** Ing. Ondřej Bartoš, Ph.D.
- Bibliografické údaje:** Počet stran: 81 Počet obrázků: 66
Počet tabulek: 17 Počet příloh: 3
- Klíčová slova:** Dýza, Eroze lopatek parní turbíny, Hrubá vodní disperze, Vodní film,
- Keywords:** Nozzle, Erosion of steam turbine blades, Coarse droplets, Water film
- Anotace:** Diplomová práce je zaměřena na návrh nového tunelu a dýzy pro trať měření hrubé vodní disperze. Rešerše se zabývá problematikou eroze lopatek parních turbín a popsáním několika provedených experimentů. V praktické části je provedeno měření na původní dýze a následně jsou uvedeny její nedostatky, které jsou eliminovány v novém návrhu.
- Abstract:** The diploma thesis focuses on designing a novel tunnel and nozzle for the measurement of the coarse droplets. The research deals with the issue of erosion of steam turbine blades and the description of several experiments. In the practical part, the measurement on the original nozzle is performed, and then there is a list of its deficiencies which are eliminated in the new design.

Poděkování

Děkuji Ing. Ondřeji Bartošovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování diplomové práce věnoval a Petru Střížovi za ochotu při realizaci experimentu.

Obsah

Čestné prohlášení	2
Anotační list	3
Poděkování.....	4
Seznam symbolů, indexu a zkratk.....	7
Rešerše	7
Experimentální část.....	7
1 Úvod.....	9
2 Eroze lopatek parních turbín.....	10
2.1 Parní turbína	10
2.2 Vliv vlhkosti páry na parní turbínu	11
2.3 Průběh eroze lopatky nízkotlakého úseku turbíny	13
2.4 Způsoby snižování eroze lopatek parní turbíny	14
2.4.1 Přehřívání páry.....	14
2.4.2 Geometrie lopatek a kol.....	15
2.4.3 Odstranění vlhkosti z lopatek rozváděcího kola	15
2.4.4 Materiál.....	15
2.5 1-D model vodního rázu.....	15
3 Experimentální měření eroze vodních kapek.....	18
3.1 Použití experimentální trati pro porovnání nátěrů z hlediska eroze.....	19
3.2 Použití experimentální trati pro zkoumání fází eroze	20
3.3 Použití experimentální trati pro předpověď životnosti lopatky	22
3.4 Použití experimentální trati pro porovnání s odstavenými lopatkami	23
4 Rozpad kapalinového filmu.....	24
4.1 Bezrozměrná kritéria.....	24
4.2 Experimentální stanovení kritického Weberova čísla.....	24
4.3 Experimentální stanovení závislosti Weberova čísla na rychlosti	25
5 Současná dýza.....	27
5.1 Popis experimentu.....	27
5.2 Současná dýza	28
5.3 Popis měření.....	28
5.4 Použitá zařízení	29
5.4.1 Lopatka	29

5.4.2	Dýza	29
5.4.3	Ustalovací nádoba	30
5.4.4	Kompresor	30
5.4.5	Čerpadlo	30
5.4.6	Snímače tlaku	31
5.4.7	Sonda pro měření celkové teploty	31
5.4.8	Mikroampérmetr	32
5.4.9	Spraytec	32
5.4.10	Kamera	33
5.5	Měření na staré dýze	33
5.5.1	Rychlost v dýze	33
5.5.2	Spraytec	36
5.6	Zadní sklo	40
5.7	Vyhodnocení fotogrammetrie	42
5.8	Diskuze výsledků	44
6	Návrh nové dýzy	46
6.1	Cíle	46
6.2	Návrh nového tunelu	46
6.3	Návrh dýzy	46
6.4	Žebrování	50
6.5	Dávkování vody	52
6.6	Průtokoměry	54
6.6.1	Nerušivé průtokoměry	54
6.6.2	Rušivé průtokoměry	55
6.7	Výběr průtokoměru	57
6.8	Měření na nové dýze	58
6.9	Diskuze výsledků	64
7	Finální verze dýzy	65
7.1	Návrh dýzy	65
8	Závěr	70
9	Literatura	73
10	Seznam tabulek	77
11	Seznam Obrázků	78
12	Seznam příloh	81

Seznam symbolů, indexu a zkratek

Rešerše

$\eta_t [-]$	<i>Termodynamická účinnost turbíny</i>
$h_i [J/kg]$	<i>Měrná entalpie v daném bodě</i>
$E [mm/h]$	<i>Míra eroze</i>
$v [m/s]$	<i>Rychlost dopadajících kapek</i>
$d [\mu m]$	<i>Průměr kapky</i>
Ψ	<i>Skalární funkce polohy a času</i>
$a [m/s]$	<i>Rychlost zvuku</i>
$x [m]$	<i>Souřadnice polohy</i>
$y [m]$	<i>Souřadnice polohy</i>
$t [s]$	<i>Čas</i>
$R_{p0,2} [MPa]$	<i>Mez kluzu</i>
$R_m [MPa]$	<i>Mez pevnosti v tahu</i>
$E [GPa]$	<i>Modul pružnosti v tahu</i>
$\rho'' [kg/m^3]$	<i>Hustota proudícího média</i>
$\rho' [kg/m^3]$	<i>Hustota kapalně fáze</i>
$We [-]$	<i>Weberovo číslo</i>
$w_R [m/s]$	<i>Relativní rychlost mezi vznikající kapkou a proudem</i>
$\sigma [N/m]$	<i>Povrchové napětí kapky</i>
$Lp [-]$	<i>Laplaceovo číslo</i>
$\eta [Pas]$	<i>Dynamická viskozita</i>

Experimentální část

$We [-]$	<i>Weberovo číslo</i>
$\sigma [m/s]$	<i>Povrchové napětí kapky</i>
$d [\mu m]$	<i>Průměr kapky</i>
$T_0 [K]$	<i>Teplota v ustalovací nádobě</i>
$p_0 [kPa]$	<i>Tlak v ustalovací nádobě</i>

p_1 [kPa]	<i>První statický tlak</i>
p_2 [kPa]	<i>Druhý statický tlak</i>
a [m/s]	<i>Rychlost zvuku</i>
v_1 [m/s]	<i>Rychlost vzduchu v místě prvního statického tlaku</i>
κ [-]	<i>Poissonova konstanta</i>
r [J/kgK]	<i>Měrná plynová konstanta</i>
ρ_1 [kg/m ³]	<i>Hustota vzduchu v místě prvního statického tlaku</i>
V_i [%]	<i>Objemový podíl</i>
D_{32} [μm]	<i>Sauterův průměr</i>
D_{43} [μm]	<i>Debroukerův průměr</i>
N_i [-]	<i>Počet kapek</i>
w_L [m/s]	<i>Rychlost vzduchu u odtokové hrany nové dýzy</i>
ρ_L [kg/m ³]	<i>Hustota vzduchu u odtokové hrany nové dýzy</i>
A [m ²]	<i>Průřez měřícího tunelu</i>
A_k [m ²]	<i>Kritický průřez dýzy</i>
x [mm]	<i>Souřadnice polohy</i>
y [mm]	<i>Souřadnice polohy</i>

1 Úvod

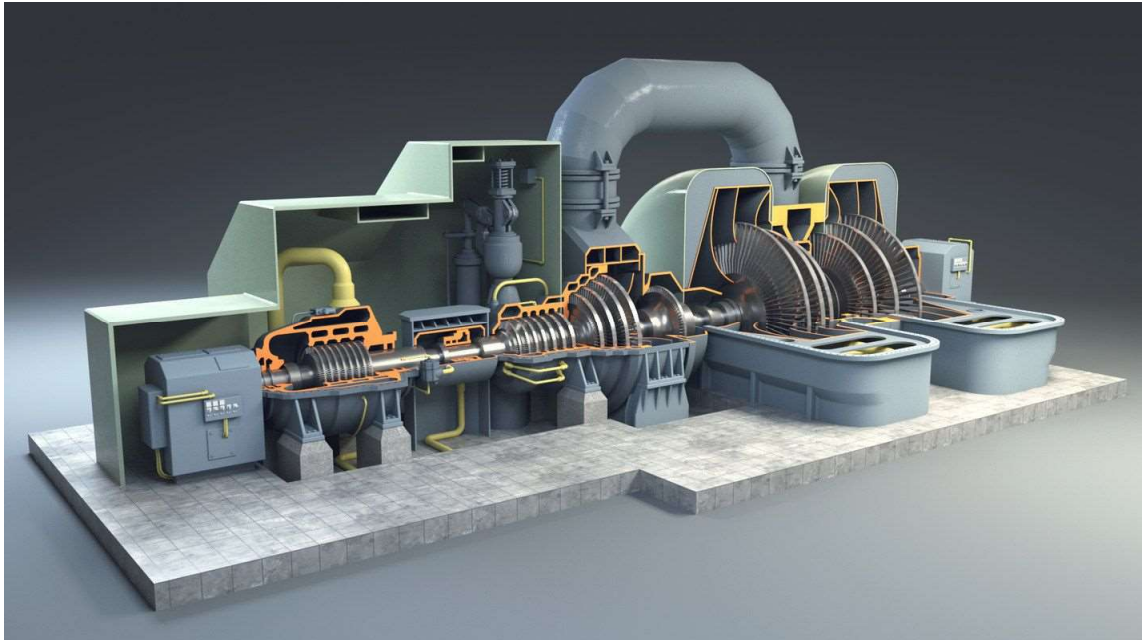
V současné době mají parní turbíny v energetickém průmyslu stále významnou roli, přestože je snaha globálně snížit podíl fosilních paliv v energetickém mixu a dosáhnout uhlíkové neutrality do roku 2050. Kromě energetického využívání fosilních paliv jsou parní turbíny využívány u jaderných elektráren a obnovitelných zdrojů. Odstavené uhelné elektrárny bude možné v budoucnu přestavět například na Carnotovy baterie využívající roztavenou sůl jako zdroj tepla parního okruhu. Jedním ze zásadních témat při provozování parních turbín je eroze posledních stupňů lopatek. Vlhkost páry a vysoká obvodová rychlost lopatek způsobuje při dlouhodobém využívání turbín erozivní působení na materiál lopatek, které výrazně zkracuje její životnost. Hlavním mechanismem eroze lopatek parních turbín je tvorba hrubé vodní disperze na rozváděcích lopatkách, která následně způsobuje dopadem na oběžné lopatky úbytek jejich materiálu. Využívání obnovitelných zdrojů energie vystavuje lopatky nenávrhovému režimu, který způsobuje ještě větší vlhkost. Tvoří se větší množství hrubé vodní disperze a následně dochází k znatelnému snižování životnosti turbíny. Mechanismus hrubé vodní disperze je stále nedostatečně prozkoumán navzdory velkému vlivu na životnost turbíny.

Práce je v teoretické části zaměřena na shrnutí informací o erozi lopatek parních turbín a prováděných experimentech. Cílem praktické části práce je provedení inovace stávající měřicí trati pro měření hrubé vodní disperze v laboratořích ústavu energetiky ČVUT na Julisce. Trať umožňuje zkoumání vlivu povrchu materiálu na tvorbu hrubé vodní disperze pomocí dvou optických metod. V současné době na měřicí trati probíhají projekty a další jsou naplánovány. Z těchto důvodů je potřeba vylepšit stávající trať. Za účelem stanovení výhod a nevýhod trati je provedeno kompletní měření. Následně je proveden návrh, který eliminuje zjištěné nedostatky. V poslední části je uskutečněno kompletní měření na inovované trati pro zhodnocení vhodnosti tohoto řešení.

2 Eroze lopatek parních turbín

2.1 Parní turbína

Parní turbína je zařízení, které slouží k přeměně tepelné energie na mechanickou energii pomocí expanze páry. Je tvořena dvěma soustavami lopatek (lopatkovými koly). První nepohyblivé kolo se nazývá rozváděcí a druhé pohyblivé kolo se nazývá oběžné. Do turbíny vstupuje pára o vysokém tlaku a teplotě. Průtokem páry turbínou dochází k poklesu entalpie, tlaku a teploty a k nárůstu měrného objemu. Je proto nutné, aby následující stupně měly větší průřez, tedy větší lopatky. Jedním z možných rozdělení parních turbín je na turbíny rovnotlaké a přetlakové. U rovnotlaké turbíny dochází k expanzi a poklesu tlaku pouze při průchodu rozváděcím kolem. U přetlakové turbíny dochází k expanzi a poklesu tlaku u rozváděcího i oběžného kola. Ke zvýšení účinnosti se často turbína rozděluje na vysokotlaké, středotlaké a nízkotlaké části a využívá se regenerace. Příklad tohoto uspořádání je zobrazen na Obr.1, kde na levé straně je vysokotlaká část turbíny s malými lopatkami a napravo je nízkotlaká část s velkými lopatkami. [1]



Obr.1 Parní turbína [2]

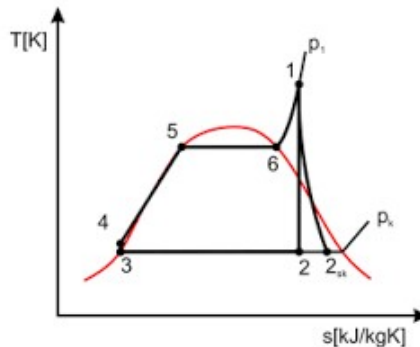
Na Obr.2 je zobrazen T-s diagram Rankin-Clausiova cyklu. Jedná se o základní cyklus elektráren, které pracují s parní turbínou. Průchod páry turbínou je zde vyznačen křivkou

1-2 pro turbínu se stoprocentní účinností a křivkou 1-2sk pro reálnou turbínu s účinností menší než sto procent. V tomto případě dochází k expanzi páry z oblasti přehřáté páry o tlaku p_1 na páru v oblasti mokré páry o tlaku p_2 . Z obrázku je patrné, že skutečná parní turbína bude oproti ideální turbíně pracovat v oblasti sušší páry. Termodynamickou účinnost parní turbíny lze pomocí měrných entalpií spočítat podle následujícího vztahu:

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_{2sk}}{h_1 - h_2} \quad (1)$$

Kde:

h_i [J/kg] je měrná entalpie v daném bodě



Obr.2 T-s diagram Rankin-Clausiova cyklu [3]

U reálné turbíny dochází ke ztrátám, které snižují výslednou práci reálné turbíny oproti turbíně ideální. Tyto ztráty se mohou dělit na ztráty vnější a vnitřní. Mezi vnitřní ztráty patří ztráty na lopatkách, které zahrnují například ztráty třením v lopatkách, ztráty změnou směru proudění páry nebo ztráty vlivem vlhkosti páry. [1] [4] Vnitřní ztráty také zahrnují tření rotoru, ztráty netěsností a ztráty ventilační. Vnější ztráty jsou ztráty mechanické a ztráty tepla do okolí. V této práci je dále věnována pozornost problematice vlhkosti páry. [1]

2.2 Vliv vlhkosti páry na parní turbínu

Výskyt kapiček vody v páře, která expanduje v parní turbíně, způsobuje snížení účinnosti turbíny a opotřebování jejích lopatek. Tento jev se vyskytuje především v nízkotlaké části turbíny, kde pára pro co nejvyšší účinnost cyklu expanduje do nízkých tlaků do oblasti s mokrou parou. Dochází k nukleaci jemných kapek vody, které postupně vytvářejí vrstvu vodního filmu na lopatkách rozváděcího kola. V určitou chvíli se tato stále rostoucí vrstva

z lopatky strhne a následně se vytvoří hrubé kapky, které narážejí do lopatky oběžného kola. Velikost jemných kapek se pohybuje od desítek do stovek nanometrů. Hrubé kapky mají rozměr od několika mikrometrů až do jednoho milimetru. [5-8] Velikost kapek, které způsobují opotřebenění lopatek se pohybuje v rozmezí 50 – 200 μm . Menší kapky opotřebenění nezpůsobí a větší kapky se rozpadnou na menší.[8] Na Obr.3 je znázorněn vznik hrubých kapek. V současné době je stále nedostatečná znalost toku hrubých kapek a distribuce jejich velikostí. Míra eroze lopatek se pohybuje přibližně okolo $7.79 \cdot 10^{-5} mm/h$. Míra eroze závisí na rychlosti dopadající kapky, na průtoku dopadajících kapek, na velikosti dopadajících kapek a na tvrdosti daného materiálu. Se zvyšující se rychlostí dopadajících kapek, s rostoucí velikostí kapek a se zvýšeným průtokem dopadajících kapek míra eroze stoupá. Se zvyšující se tvrdostí materiálu naopak klesá. Pro rychlost dopadajících kapek, pokud všechny ostatní veličiny zůstanou stejné, je empiricky zjištěná závislost daná vztahem:[9]

$$E \sim v^5 \quad (2)$$

Kde:

E je míra eroze

v je rychlost dopadajících kapek

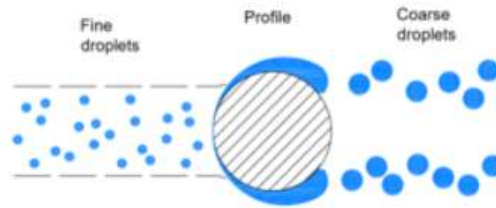
Pro běžně používaný materiál pro nízkotlaké turbíny Ti-6Al-4V byla experimentálně vyjádřena závislost mezi velikostí kapky a mírou eroze jako: [10]

$$E \sim d^{2,5} \quad (3)$$

Kde:

E je míra eroze

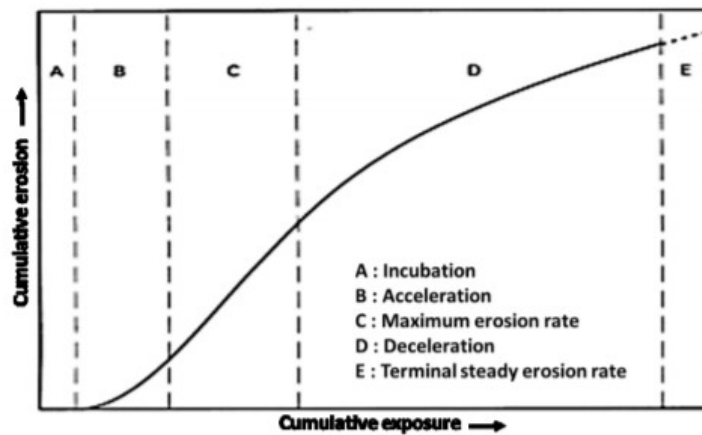
d je průměr dopadající kapky



Obr.3 Vznik hrubých kapek na lopatce turbíny [5]

2.3 Průběh eroze lopatky nízkotlakého úseku turbíny

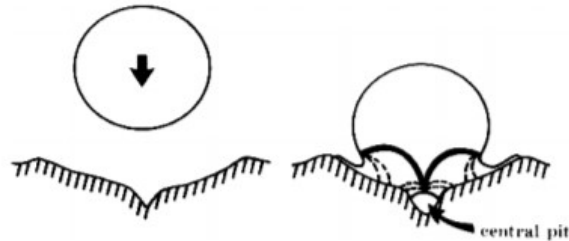
Na Obr.4 je zobrazen průběh eroze s dobou provozu turbíny. Z obrázku je patrné, že míra eroze se s časem mění. Na obrázku lze pozorovat pět fází eroze, kde první z nich je inkubace, při které dochází k zdrsnění povrchu při žádném úbytku materiálu. Následuje úsek urychlení, ve kterém dojde k tvorbě eroze se vrůstající mírou eroze. Třetí úsek je úsek s maximální konstantní mírou eroze. Dále následuje fáze s poklesem míry eroze a v poslední části dochází ke konstantní mírné míře eroze. [10]



Obr.4 Průběh eroze [10]

Průběh míry eroze lopatek parní turbíny je proměnný s časem. Po určité době provozu turbíny dochází k poklesu úbytku materiálu. Jednou z hypotéz je, že po určité době hloubka odebraného materiálu dosáhne takového rozměru, že v místě eroze dochází k tvorbě vodního filmu, který zmírňuje nárazy do lopatky. Další hypotéza pojednává o tom, že po určité době dojde k takovému odebrání materiálu, že průměr poškození je znatelně větší než průměr dopadající kapky. Náraz je potom zmírněn dopadem na šikmou

plochu. Schéma dopadu kapky na povrch zkorodované lopatky je zobrazeno na následujícím obrázku (Obr.5). [10]



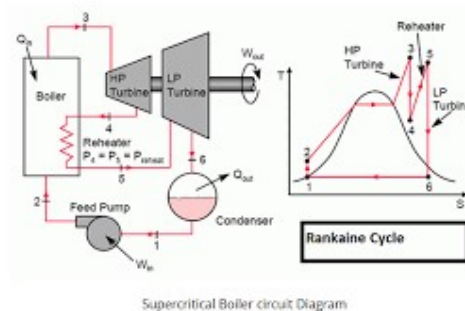
Obr.5 Dopad kapky na povrch zkorodované lopatky [10]

2.4 Způsoby snižování eroze lopatek parní turbíny

Jelikož se v posledních letech rozšířil vývoj nízkotlakých turbín s vysokými průtokovými rychlostmi páry, je tento problém velmi aktuální. Při provozu turbíny v oblasti mokré páry je opotřebení lopatek nevyhnutelné. Lze ho však umírnit několika následujícími způsoby.

2.4.1 Přehřívání páry

Prvním způsobem, jak snížit vliv mokré páry na turbínu je přehřívání páry. Pomocí přehřátí je turbína vystavena mokré páře kratší dobu a také pracuje v oblasti s menším výskytem kapek. Příklad Rankine-Clausiova cyklu s dodatečným přehřátím páry se nachází na následujícím obrázku (Obr.6). [1][7]



Obr.6 Dodatečné přehřátí páry [11]

2.4.2 Geometrie lopatek a kol

Zvýšením osové vzdálenosti mezi rozváděcím a oběžným kolem dojde k tomu, že hrubé kapky mají větší prostor k zrychlení a k jejich následnému rozpadu na menší rozměry. Dále tenčí odtokové hrany lopatek na rozváděcím kole způsobují, že se z vrstvy na lopatce vytvářejí menší hrubé kapky. [7]

2.4.3 Odstranění vlhkosti z lopatek rozváděcího kola

Odstranění vlhkosti z lopatek rozváděcího kola lze provést tak, že jsou lopatky opatřeny šterbinami, kterými se vrstva z lopatek odsává. Další způsob odstranění vlhkosti je odpařování vrstvy pomocí vnitřního ohřívání lopatek. Tyto metody jsou sice technicky náročné, ale dosahují vysoké účinnosti. [7]

2.4.4 Materiál

Volba vhodného materiálu pro lopatky a jeho úprava je také zásadní pro co nejdelší životnost turbíny. Pro snížení vlivu eroze lze na lopatky turbíny navařit slinutý karbid nebo se například lopatky mohou kalit. [1][7]

2.5 1-D model vodního rázu

Podkapitola se zabývá modelem vodního rázu a jeho aplikací na případ dopadu hrubých kapek na lopatku nízkotlaké části turbíny. Při uvažování nárazu nepružného pevného tělesa s kapalinou lze vodní ráz řešit pomocí 1-D lineární vlnové rovnice ve směru x , která se vyjádří následujícím vztahem:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (4)$$

Kde:

a je rychlost zvuku

ψ je skalární funkce polohy a času

x je souřadnice polohy

t je čas

K nárazu dojde v čase $t = 0$ s dopadovou rychlostí v_0 a platí, že $v_0 \ll a$. Okrajová podmínka je tedy dána:

$$\left. \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right|_{x=0} = v_0 \quad (5)$$

Zavedeme-li proměnné α a β definované jako $\alpha = x - at$ a $\beta = x + at$, řešení rovnice je dáno jako:

$$\Psi = f(\alpha) + g(\beta) = f(x - at) + g(x + at) \quad (6)$$

Řešení této vlnové rovnice je lineární superpozice dvou křivek pohybujících se rychlostí a ale opačným směrem. Při vodním rázu existuje pouze ta směřující v kladném směru x . Pro nízkou dopadovou rychlost je rázový tlak $p|_{x=0}$ určen: [12]

$$p|_{x=0} = -\rho \left. \frac{\partial \Psi}{\partial t} \right|_{x=0} = -\rho(-a)f'(x - at)|_{x=0} = \rho a \left. \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right|_{x=0} = \rho a v_0 \quad (7)$$

Kde:

ρ je hustota kapaliny

2.5.1.1 Tlak vyvolaný nárazem kapky do lopatky turbíny

Tlak vyvolaný při nárazu kapky do lopatky lze vypočítat podle následujícího vztahu:

$$p = \rho \cdot a \cdot v \cdot \left(1 + \frac{k \cdot v}{a} \right) \quad (8)$$

Kde:

p [Pa] je tlak vyvolaný dopadem kapky na turbínu

v [m/s] je dopadová rychlost kapky na lopatku

a [m/s] je rychlost zvuku, která reprezentuje rázové vlny

$k \sim 2$ je konstanta závislá na dopadající kapalině (pro vodu přibližně rovná dvěma)

První část vztahu představuje vodní ráz a druhá část představuje proměnnost rázových vln. Ze vztahu je patrné, že tlak vyvolaný dopadem kapky na lopatku nezávisí na její velikosti. Velikost kapky má ovšem vliv na dobu, po kterou na lopatku působí. [7]

Pokud bychom uvažovali lopatkové kolo s průměrem $d = 3 \text{ m}$ a otáčky rotorové hřídele $n = 3000 \text{ ot/min}$, byla by obvodová rychlost konce lopatky $v = \frac{\pi d n}{60} = 471,2 \text{ m/s}$. Při uvažované teplotě $T = 35 \text{ °C}$ je hodnota hustoty vody $\rho = 994,03 \text{ kg/m}^3$ a rychlost zvuku ve vodě $a = 1517 \text{ m/s}$. Jelikož je rychlost hrubé kapky oproti obvodové rychlosti lopatky zanedbatelná, můžeme při zanedbání rychlosti kapky uvažovat obvodovou

rychlost lopatky jako dopadovou rychlost kapky na lopatku. Tlak se následně vypočítá dosazením do daného vzorce:

$$p = \rho \cdot a \cdot v \cdot \left(1 + \frac{k \cdot v}{a}\right) = 994,03 \cdot 1517 \cdot 471,2 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot 471,2}{1517}\right) = 1152 \text{ MPa}$$

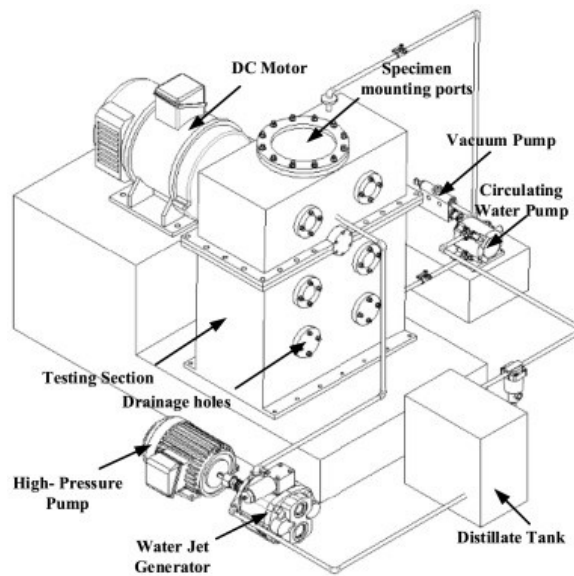
Podle provedeného výpočtu jsou tedy lopatky turbíny z nízkotlaké části vystavovány nárazem jedné kapky tlaku okolo 1,1 GPa. Doba, po kterou lopatka čelí tomuto tlaku je dána počtem dopadajících kapek a jejich velikostí. V následující tabulce (Tab.1) jsou sepsány mechanické vlastnosti vybraných materiálů používaných pro lopatky parních turbín. Z tabulky je zřejmé, že tlak vyvolaný nárazem hrubé kapky do lopatky vysoce přesahuje mez kluzu používaných materiálů.

Tab.1 Materiály lopatek [13][14]

Materiál	$R_{p0,2}$ [MPa]		R_m [MPa]		Tvrdost	E [GPa]
	20 °C	50 °C	20 °C	50 °C		
1.4923 (zušlechtěna)	700	681	1050		HB = 302	216
Ti-6Al-4V	880 – 920		900 – 950		HRC = 36	104 – 113

3 Experimentální měření eroze vodních kapek

Eroze lopatek parních turbín je komplexní problém s mnoha ovlivňujícími parametry, a proto je pro její posouzení obtížné aplikovat teoretické analýzy nebo numerické simulace. Z toho důvodu jsou vyvíjeny experimentální tratě, které většinou simulují náraz kapek na lopatky oběžného kola. Tato zařízení lze rozdělit podle relativní pozice vzorku a kapek. U prvního případu je relativní pozice proudu vody nebo kapek nezměněna a k nárazu dochází rotačním pohybem vzorku. Příklad takovéto experimentální trati je zobrazen na Obr.7. Rotační pohyb vzorku je zajištěn pomocí stejnosměrného motoru s převodovkou a dávkování vody je zajištěno pomocí čerpadel a generátoru vodního proudu. [15]



Obr.7 Experimentální trať prvního typu [15]

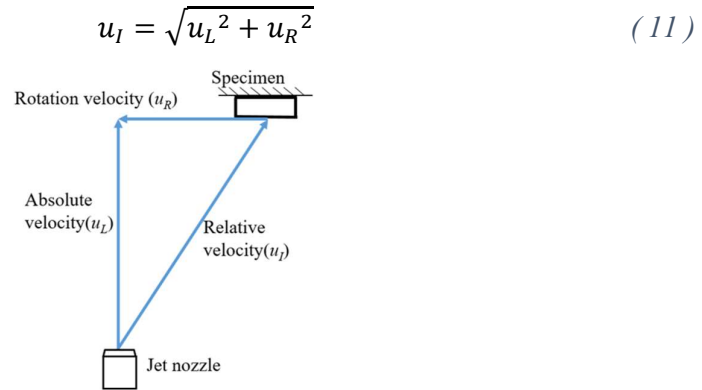
Axiální rychlost dopadu proudu na vzorek u_L ve vzdálenosti L od výstupu proudu z trysky lze spočítat dle následující rovnice.

$$u_L = ue^{-\zeta_a L} \quad (9)$$

Kde ζ_a značí koeficient útlumu a u rychlost proudu na výstupu z trysky. Obvodová rychlost vzorku lze z otáček n a průměru D spočítat následovně.

$$u_R = \pi D n \quad (10)$$

Relativní rychlost dopadu proudu u_I se stanoví z rychlostního trojúhelníku podle Obr.8. [16]

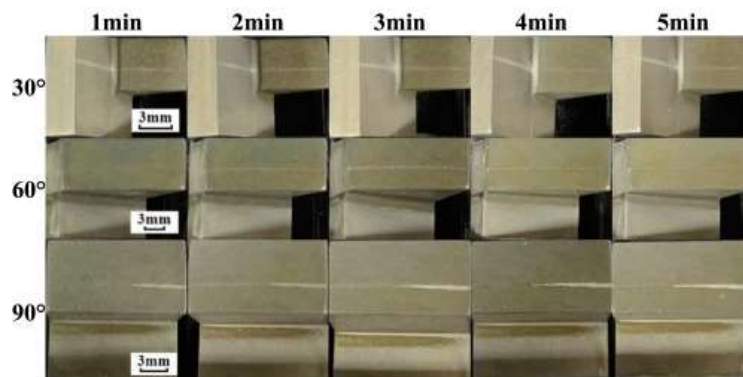


Obr.8 Rychlostní trojúhelník u experimentální trati prvního typu [16]

Druhým typem je případ, kdy je relativní pozice vzorku neměnná a dopadá na něj vysokorychlostní proud vody nebo kapek. V tomto případě by dopadající rychlost odpovídala hodnotě absolutní rychlosti podle rovnice (9). [15][16] Následující podkapitoly se zabývají rešerší nedávných vybraných experimentů eroze lopatek parních turbín.

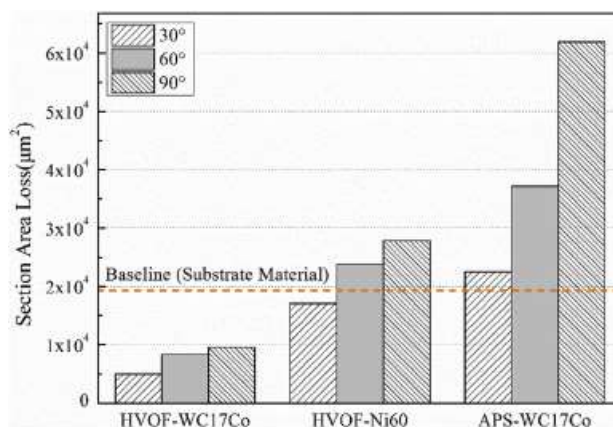
3.1 Použití experimentální trati pro porovnání nátěrů z hlediska eroze

Zhang et al. (2019) prováděli porovnání nátěrů lopatek oběžného kola na nové trati z Obr.7, která umožňovala dosažení obvodové rychlosti vzorku až 600 m/s . Cílem bylo vytvořit podmínky, které simulovali nízkotlaké stupně parních turbín s velmi dlouhými lopatkami, které dosahovali délky až 2 m . Porovnávané nátěry byly vyrobeny ze dvou slitinových prášků WC-17Co a Ni60 pomocí dvou procesů plazmového nástřiku (APS) a vysokorychlostního nástřiku (HVOF). Nátěry byly nanášeny na ocel 0Cr17Ni4Cu4Nb. Pro náraz s rotujícím vzorkem bylo využito vysokorychlostního vodního proudu, který periodicky zatěžoval vzorek s frekvencí $f = 0,04 \text{ s}^{-1}$. Vzorky byly upraveny tak, že v místě dopadu proudu byl vytvořen úhel $30^\circ, 60^\circ$ a 90° . Míra eroze byla sledována jako úbytek materiálu pomocí optického mikroskopu. Na Obr.9 je zobrazen průběh eroze pro vzorky s spraškem WC-17Co a vysokorychlostním nástřikem. [15]



Obr.9 Průběh eroze pro jednotlivé úhly a nátěr HVOF WC-17Co [15]

Na Obr.10 je vyjádřen úbytek materiálu pro jednotlivé nátěry a úhly dopadu proudu vody. Červenou čarou je zde vyznačena hodnota pro samotnou ocel 0Cr17Ni4Cu4Nb. Z grafu je patrné, že nátěr WC17Co pomocí vysokorychlostního nástřiku má nejmenší úbytek a to o 50,6 % menší než samotná ocel. Zároveň z výsledků vyplývá, že čím větší je úhel vzorku, tím dochází k většímu opotřebení. [15]

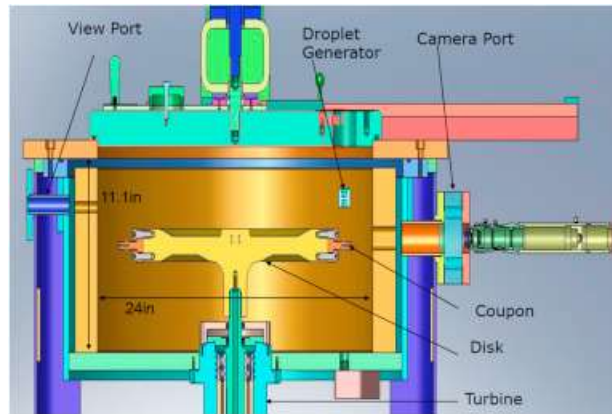


Obr.10 Úbytek materiálu jednotlivých nátěrů [15]

3.2 Použití experimentální trati pro zkoumání fází eroze

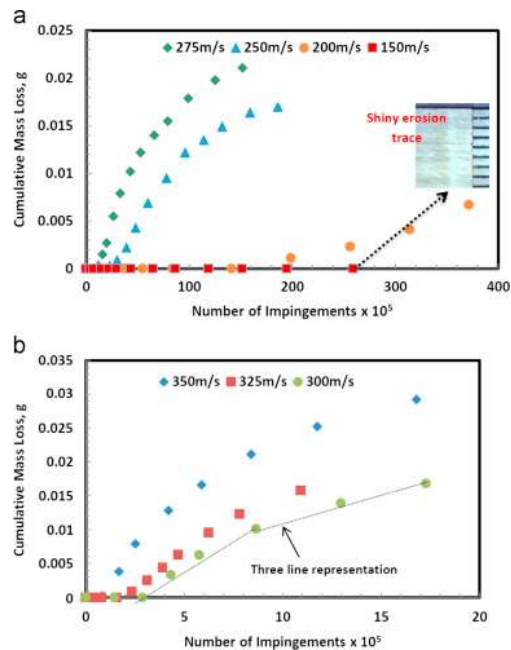
Gujba et al. (2016) využili experimentální trať pro zkoumání fází eroze lopatek. Erozi způsobenou hrubou vodní disperzí zkoumali kvůli erozi lopatek kompresoru spalovací turbíny při chlazení vstupujícího vzduchu vstřikováním vodních kapek. Nárůst teploty vstupujícího vzduchu totiž zapříčiňuje snížení jeho hustoty, a to vede ke snížení účinnosti oběhu. Na obr.11 je zobrazena měřicí trať, kde se vzorek otáčí s obvodovou rychlostí 150 – 350 m/s. Materiál vzorku byl Ti-6Al-4V a distribuce velikosti kapek byla

monitorována pomocí vysokorychlostní kamery. Průměrná hodnota průměru kapek byla $463 \mu\text{m}$. Pomocí počtu kapek byl stanoven celkový objem vody. [17]



Obr.11 Měřicí trať [17]

Cílem experimentu bylo zjistit závislost kumulovaného úbytku materiálu na době vystavení nárazů kapek. Na Obr.12 je zobrazena závislost úbytku materiálu na počtu srážek pro jednotlivé rychlosti. Z výsledků byla popsána závislost maximální míry eroze na rychlosti dopadu kapek jako $ER_{max} \sim v^{9,9}$. Zároveň byla popsána raná fáze eroze, která byla způsobena mikrotrhlinami, samostatnými jamkami a nárůstem drsnosti. Pokročilá fáze byla způsobena především hydraulickým vnikáním kapek. [17]



Obr.12 Závislost úbytku materiálu na počtu srážek [17]

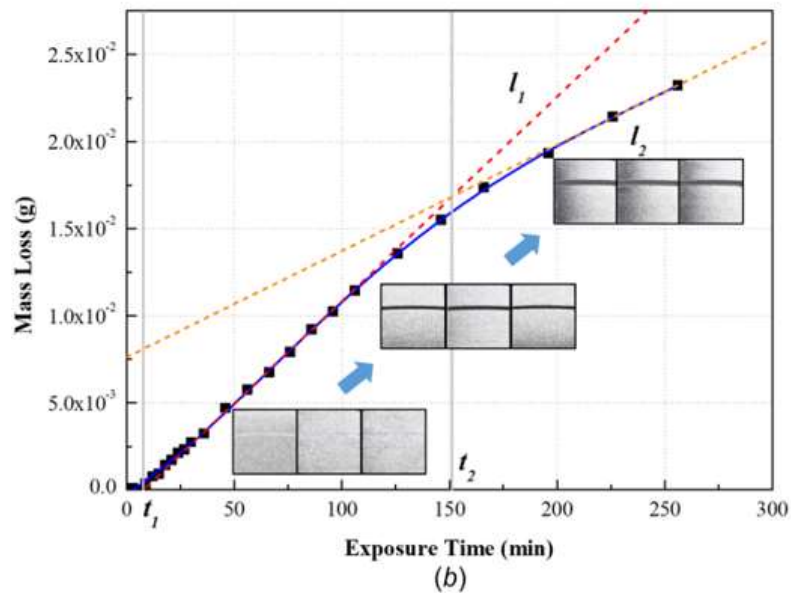
3.3 Použití experimentální trati pro předpověď životnosti lopatky

Zhang et al. (2021) využili experimentální trať k předpovědi zbývající životnosti lopatky turbíny s nejvyšší přesností predikce 0,949. Byla provedena morfologie povrchů vzorku v různých stádiích eroze. Pro určení zbývající životnosti lopatky byl stanoven koeficient životnosti, který je definován následovně. [16]

$$\zeta = \begin{cases} t/t_2 & t \in [0, t_2] \\ 1 & t \in (t_2, \infty) \end{cases} \quad (12)$$

Kde jednotlivé symboly představují: t dobu vystavení nárazů, t_2 okamžik, kdy lopatku není možné dále využívat. Tyto časy jsou vyznačeny na Obr.13, který popisuje závislost průměrných hodnot úbytku materiálu na době vystavení nárazů kapek. Pokud je hodnota koeficientu životnosti $\zeta = 1$, materiál je poškozen a je potřeba lopatku opravit nebo vyměnit. Pro $\zeta < 1$ lze vypočítat zbývající životnost t_r následovně. t_0 zde představuje dobu, po kterou byla lopatka používána. [16]

$$t_r = t_0 \frac{1-\zeta}{\zeta} \quad (13)$$



Obr.13 Závislost úbytku materiálu na době vystavení [16]

Následně byla využita metoda umělé inteligence (Resnet). Jednotlivým morfologickým snímkům byla přiřazena hodnota koeficientu životnosti a následně zbývající životnost. [16]

3.4 Použití experimentální trati pro porovnání s odstavenými lopatkami

Kirols at al. (2017) zkoumali vliv eroze kapek s použitím dvou odstavených lopatek z provozu. Cílem bylo propojení výsledků z testovacích zařízení s reálnou erozí lopatek. Porovnávali SEM mikrofotografie odstavených lopatek se vzorky experimentální trati. Největší podobnost vzhledu poškození byla s experimentální trati s více tryskami. Zároveň potvrdili podobnost ranné fáze eroze, kdy nejprve dochází ke zvýšení drsnosti a k tvorbě prohlubní. Při analýze odstavených lopatek rostla míra eroze od paty lopatky ke špičce, kde se ovšem v určité části opět mírně zmenšila. Obvodová rychlost přitom směrem od lopatky ke špičce roste. Tento jev byl odůvodněn zmenšujícím se úhlem natočení lopatky směrem ke špičce. [18]

4 Rozpad kapalinového filmu

Erozi lopatek parních turbín lze také zkoumat z pohledu tvorby a rozpadu vodního filmu. Po rozpadu filmu kapička nedosahuje ihned stabilního kulového tvaru, ale dochází ke kmitům. Při nestabilitě kmitů dochází k rozpadu na menší kapky. Důležitým faktorem tvorby eroze je velikost vznikajících kapek, která závisí na relativní rychlosti mezi proudícím médiem a vznikající kapkou, viskozitou a hustotou kapalné fáze a proudící tekutiny. Tyto veličiny lze popsat několika bezrozměrnými kritérii. [19]

4.1 Bezrozměrná kritéria

Weberovo číslo vyjadřuje vztah mezi dynamickým tlakem proudu tekutiny vůči povrchovému napětí kapalné fáze. Vypočítá se podle následujícího vztahu. [19]

$$We = \frac{w_R^2 \rho'' D}{\sigma} \quad (14)$$

Kde w_R zde značí relativní rychlost mezi vznikající kapkou a proudící tekutinou, ρ'' značí hustotu proudící tekutiny, D značí průměr kapky a σ značí povrchové napětí kapky. Laplaceovo číslo vyjadřuje vztah viskózních sil vůči povrchovým silám. Vypočítá se podle následujícího vztahu. [19]

$$Lp = \frac{D \rho' \sigma}{\eta} \quad (15)$$

Kde ρ' značí hustotu kapalné fáze a η značí dynamickou viskozitu.

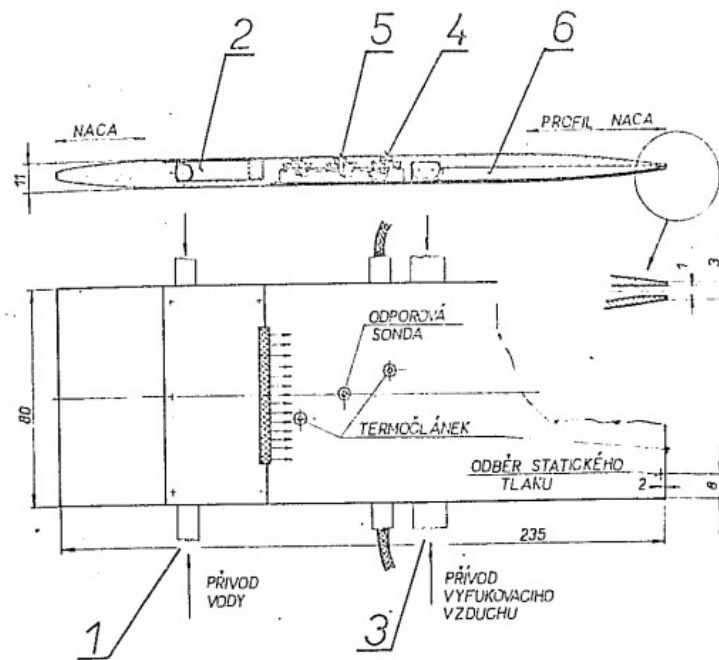
4.2 Experimentální stanovení kritického Weberova čísla

Pro stanovení kritického Weberova čísla bylo provedeno několik výzkumů. Valha at. al (1978) určoval hodnotu kritického Weberova čísla analyticko-experimentální metodou. Nejprve byla experimentálně stanovena maximální velikost kapek, které se tvořily na symetrickém profilu a rozložení rychlosti v úplavu. Následně byla analyticky určena relativní rychlost kapičky. Kritické Weberovo číslo se stanovilo porovnáním maximální naměřené kapičky analyticky zjištěnou s kapičkou. Měření bylo provedeno pro rychlosti proudu $v_1 = 80 \text{ m/s}$ a $v_2 = 40 \text{ m/s}$. Maximální průměry kapek pro jednotlivé rychlosti následně vycházely $D_1 = 200 \text{ }\mu\text{m}$ a $D_2 = 550 \text{ }\mu\text{m}$ a Weberova čísla $We_1 = 21$ a $We_2 = 18,33$. Při následném měření na skutečné turbíně ovšem vznikající kapky dosahovaly větších rozměrů. [19]

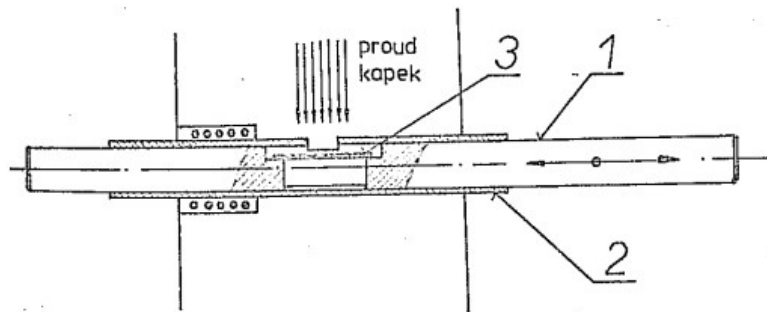
4.3 Experimentální stanovení závislosti Weberova čísla na rychlosti

Následně byl proveden experiment s cílem stanovit závislost Weberova čísla na rychlosti okolního proudu. Schéma měřicí trati je zobrazeno na Obr.14. Měřicí trať byla uspořádána tak, že v Lavalově dýze byl umístěn symetrický profil, jehož odtokovou hranu bylo možné umístit až v kritickém průřezu. Do dýzy byla přiváděna voda, která protékala k odtokové hraně a jako proudící médium byl použit vzduch. V průběhu experimentu byla měřena tloušťka filmu odporovou sondou, teplota filmu termočlánkem a statický tlak.

[19]

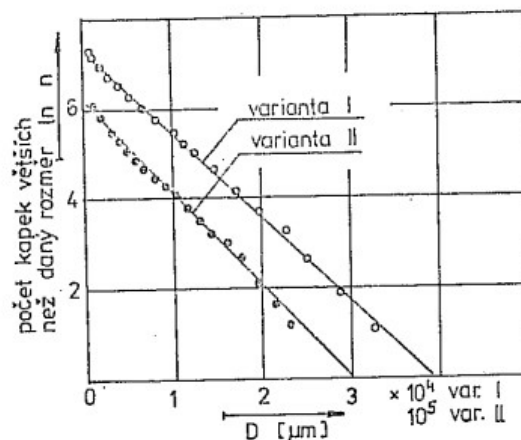


Obr.14 Měřicí dýza s profilem [19]



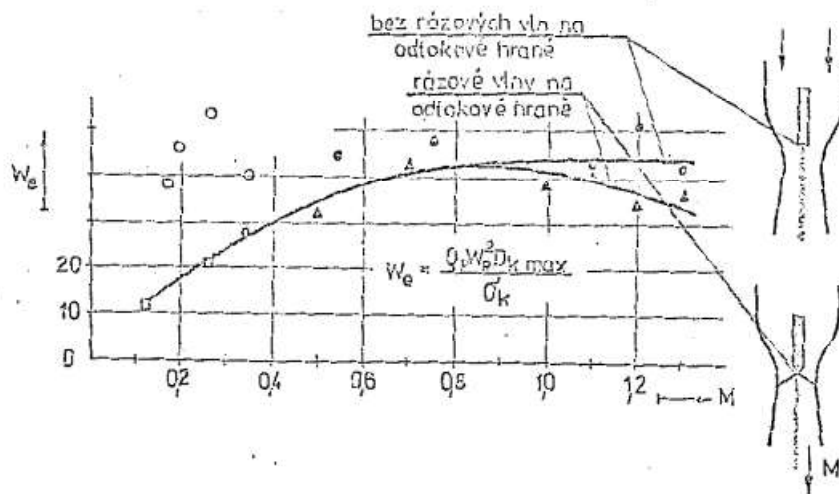
Obr.15 Sonda na zachycování kapek [19]

Na Obr.15 je zobrazena sonda pro zachycování kapek. Číslem 3 je označené mikroskopické sklíčko, na kterém je nanесena vrstva olejového filmu. Po skončení experimentu se sklíčko vyjmulo a následně se pod mikroskopem vytvořily snímky. [19]



Obr.16 Počet kapek daných rozměrů [19]

Na Obr.16 je zobrazen počet kapek daných rozměrů a na Obr.17 je zobrazena závislost Weberova čísla na Machově čísle proudícího vzduchu. [19]



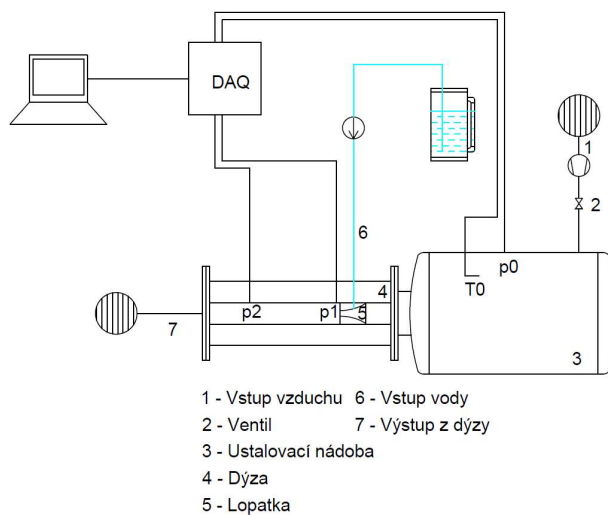
Obr.17 Závislost Weberova čísla na Machově čísle proudícího vzduchu [19]

5 Současná dýza

Praktická část diplomové práce se zabývá vylepšením stávající dýzy experimentální trati umístěné ve výzkumné laboratoři ústavu energetiky na Julisce. Experimentální trať slouží k měření hrubé vodní disperze za podmínek, které simulují nízkotlaký stupeň parní turbíny. Pro měření hrubé vodní disperze je využito dvou optických metod. Na měřicí trati je možné zkoumat vliv různých povrchů na tvorbu hrubé vodní disperze. V současné době i v budoucnu zde proběhne několik projektů. Bartoš at. al (2021) provedli na experimentální trati měření s cílem porovnat vliv různých nátěrů na tvorbu hrubé vodní disperze. [20] Dále Bartoš at. al (2022) provedli měření s cílem zkoumání vznikajícího náboje při hrubé vodní disperzi. [21] Tato kapitola je zaměřena na popis experimentu, kompletní měření na současné dýze a zhodnocení jejich výhod a nevýhod.

5.1 Popis experimentu

Experiment spočívá v měření distribuce velikostí kapek vznikajících na lopatce při expanzi vzduchu v dýze, která simuluje mezilopátkový kanál rozváděcího kola parní turbíny. V dýze jsou simulovány parametry nízkotlakého stupně turbíny v oblasti mokré páry. Kompresorem stlačený vzduch expanduje v dýze. Zároveň je z boku do dýzy dávkována voda, která stéká po profilu simulujícím lopatku rozváděcího kola. Na profilu vzniká vrstva vodního filmu, který se následně vlivem proudícího vzduchu strhne z odtokové hrany. Dochází ke tvorbě hrubých kapek, které jsou následně měřeny zvolenou metodou.



Obr.18 Schéma experimentální tratě

Na Obr.18 je zobrazeno schéma experimentální tratě. Pomocí kompresoru se stlačí vzduch na požadovaný tlak. Otevřením ventilu proudí vzduch do nádoby, kde dojde k jeho ustálení. Zároveň je zde měřena teplota vzduchu v ustalovací nádobě T_0 a dynamický tlak v ustalovací nádobě p_0 . S otevřením ventilu je současně spuštěno čerpadlo, které dávkuje vodu ze zásobníku do dýzy, kde voda stéká po profilu. Vzduch z ustalovací nádoby proudí a expanduje v dýze na atmosférický tlak. Na lopatce vzniká vodní film, který se v určitém okamžiku odtrhne a dýzou proudí vzniklé hrubé kapky. V dýze jsou také měřeny statické tlaky p_1 a p_2 a náboj vznikajících kapek.

5.2 Současná dýza

Na následujícím obrázku (Obr.19) je zobrazena současná dýza měřicí tratě. Dýza je opatřena dvěma průhledítky. Jedním v místě uchyceného profilu lopatky a druhým až za hranou profilu. Hrana profilu lopatky směřuje rovnoběžně s průhledítkem, takže vznikající kapky jsou rozloženy po celé výšce průtokového profilu dýzy. Profil lopatky je opatřen žlábkem, který rozvádí vodu po celé výšce lopatky, aby byla voda co nejrovnoměrněji rozložena. Voda je do dýzy dávkovaná čerpadlem přes hadičky do trubky v dýze, ze které následně voda stéká do žlábků lopatky.

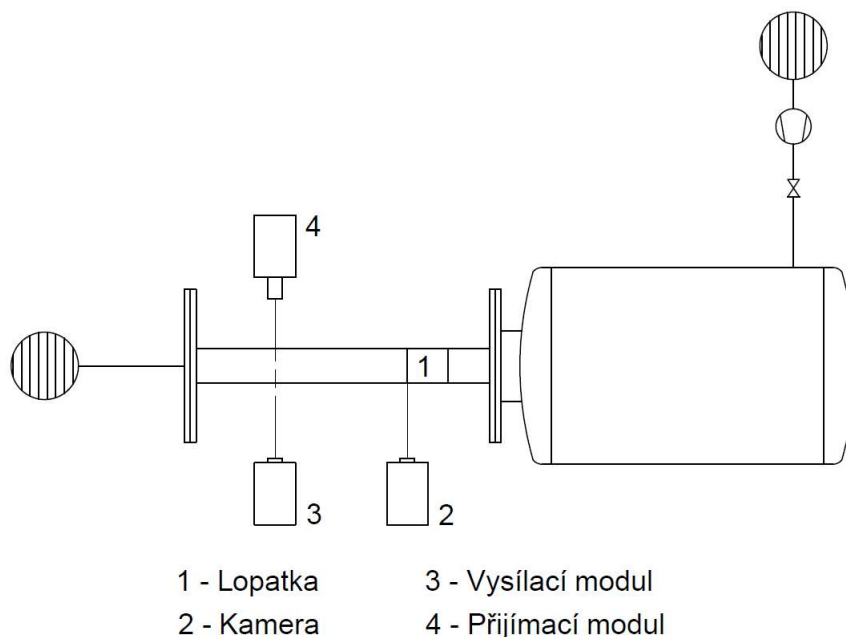


Obr.19 Stará dýza

5.3 Popis měření

Pro vyhodnocení distribuce velikostí kapek jsou využity dva typy měření. Prvním je snímání odtokové hrany kamerou a následné vyhodnocení kapek z nasnímaných obrázků. Druhé je měření pomocí zařízení Spraytec, které měří distribuci velikostí kapek za

odtokovou hranou. Výstupem jsou distribuční křivky pro jednotlivé okamžiky měření. Na obr.20 je zobrazeno uspořádání měřících zařízení v průběhu experimentu. Při využití kamery je objektiv zaostřen na odtokovou hranu. Při využití Spraytecu jsou vysílací a přijímací moduly zarovnány za odtokovou hranou.



Obr.20 Schéma měření

5.4 Použitá zařízení

V následujících podkapitolách jsou popsána použitá zařízení experimentu.

5.4.1 Lopatka

Pro tvorbu vodního filmu je využit profil NACA008, který je opatřen odtokovou hranou a drážkou pro dávkování vody, která zajišťuje dávkování vody po celé výšce lopatky.

5.4.2 Dýza

Dýza je vyrobena ze dvou přírub, mezi kterými je tyčemi vytvořen průtočný kanál. Dýza je opatřena čtyřmi průhledítky, která jsou vytvořena pomocí sklíčka s víkem. Lopatka je umístěna mezi předními průhledítky a je upevněna seshora a zespoda pomocí drátku. Levá průhledítka slouží pro případné měření se Spraytecem. Jedná se o Lavalovu dýzu, která má v kritickém průřezu umístěny profil.

5.4.3 Ustalovací nádoba

Ustalovací nádoba slouží k ustálení proudu vzduchu za uzavíracím ventilem. Umožňuje expanzi vzduchu v dýze z nulové rychlosti. Je opatřena termočlánkem a snímačem tlaku. Je tvořena válcovou částí a dvěma klenutými víky. Přívod vzduchu se nachází ve válcové části. Odvod vzduchu je na klenutém dně a je opatřen přírubou pro připojení dýzy.

5.4.4 Kompresor

Kompresor slouží k stlačení vzduchu na 3 MPa. Vzduch prochází potrubím přes ventil do ustalovací nádoby. Na Obr.21 je zobrazen použitý kompresor a na Obr.21 je zobrazen jeho štítek.



Obr.21 Kompresor



Obr.22 Štítek kompresoru

5.4.5 Čerpadlo

Čerpadlo slouží k dávkování vody ze zásobníku do dýzy. Voda je přivedena přes hadičky s průtokem 1 ml/min. Na Obr.23 je zobrazeno čerpadlo zapojené do měřicí trati.



Obr.23 Čerpadlo

5.4.6 Snímače tlaku

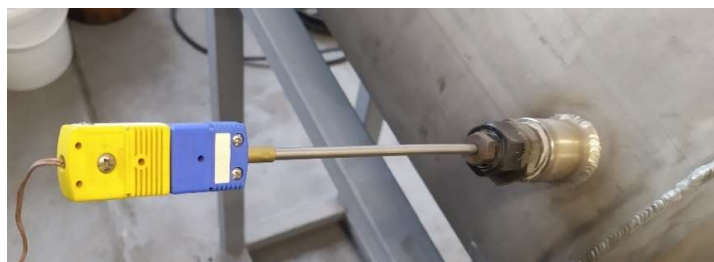
Pro měření tlaku jsou využity tlakové snímače OMEGA PXM 309 s rozsahem 0 – 3,5 bar. Na Obr.24 je zobrazeno zapojení snímačů statického tlaku.



Obr.24 Měřiče tlaku

5.4.7 Sonda pro měření celkové teploty

Na Obr.25 je zobrazen termočlánek OMEGA typu T, který slouží jako sonda pro měření celkové teploty.



Obr.25 Sonda pro měření celkové teploty

5.4.8 Mikroampérmetr

Pro měření náboje vznikajících hrubých kapek je využit mikroampérmetr KEITHLEY 427, který je zobrazen na Obr.26.



Obr.26 Mikro ampérmetr

5.4.9 Spraytec

Spraytec je zařízení na měření distribuce kapek. Pracuje na principu difrakce laseru při průchodu paprsku skrz kapky. Zdroj 4 mW He-Ne Laseru se nachází ve vysílacím modulu. Přijímací modul obsahuje čočku, která zaostřuje světlo rozptýlené od kapek na sérii detektorů, které měří intenzitu světla pod různými úhly. Pro zarovnání obou modulů slouží optická tyč. V průběhu měření je systém řízen softwarem, který zároveň analyzuje data z detektorů, z kterých následně vyhodnocuje distribuční křivku velikostí kapek. Rozsah měřitelný při jednom měření je 0,1 – 2000 μm . Zapojení Spraytecu je zobrazeno na Obr.27.



Obr.27 Spraytec

5.4.10 Kamera

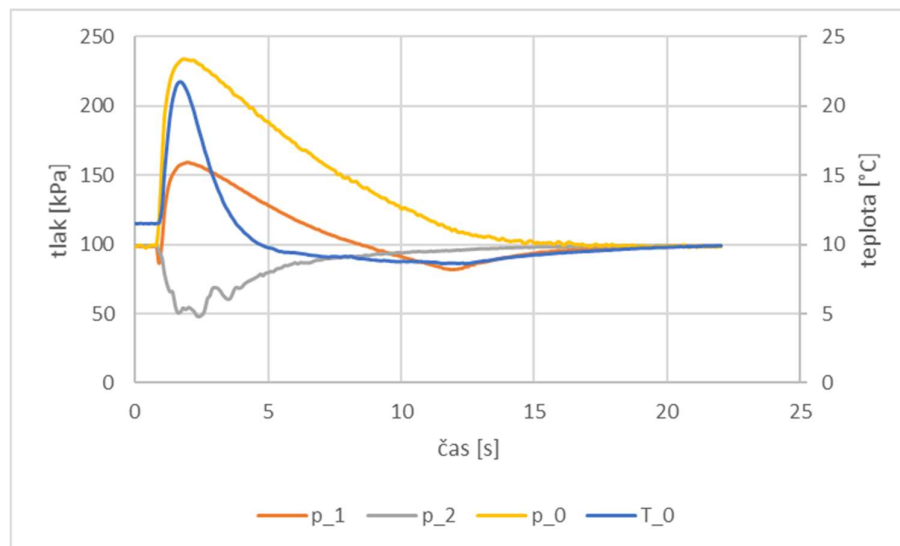
Používaná kamera je kamera Ximea MC050CG-SY s obrazovým snímačem SONY IMX250LQR-C. Rozlišení kamery je 2464x2056 pixelů s velikostí 3,45 μm .

5.5 Měření na staré dýze

Pro posouzení výhod a nevýhod současné dýzy bylo provedeno kompletní měření na dýze pomocí Spraytecu i pomocí kamery. Při měření se Spraytecem se nejprve měřilo na předním skle a následně na zadním skle. Vzduch se v kompresoru vždy stlačil na 3 *bary* a voda se do dýzy dávkovala s průtokem 1 *ml/min*. Měření bylo provedeno s leštěným nerezovým profilem. Tato podkapitola se zabývá vyhodnocením měření na staré dýze.

5.5.1 Rychlost v dýze

V průběhu měření je měřen tlak v ustalovací nádobě p_0 , teplota v ustalovací nádobě T_0 , statický tlak v blízkosti kritického průřezu dýzy p_1 a statický tlak za kritickým průřezem p_2 . Z důvodu velkého množství naměřených dat jsou jednotlivé výpočty provedeny pro jedno ukázkové měření a zbývající měření jsou vždy shrnuta v tabulkách. Na následujícím obrázku (Obr.28) je zobrazen průběh naměřených veličin při měření. Po otevření ventilu dojde k prudkému navýšení tlaku p_0 a teploty T_0 vzduchu a k následnému snížení v důsledku expanze vzduchu v dýze. Z průběhu tlaku p_0 je patrná první nevýhoda současné dýzy, protože umístění profilu v kritickém průřezu dýzy způsobuje rázové vlny.



Obr.28 Průběh teploty a tlaků při prvním měření

Při uvažování nulové rychlosti v ustalovací nádobě lze vyjádřit energetickou bilanci expanze v dýze následovně.

$$h_0 = h_1 + \frac{v^2}{2} \quad (16)$$

h_i zde značí entalpii v daném bodě a v je rychlost v místě měření tlaku p_1 . Rovnici lze upravit následovně.

$$c_p T_0 = c_p T_1 + \frac{v^2}{2} \quad (17)$$

T_i zde značí teplotu v daném bodě a c_p měrnou tepelnou kapacitu za konstantního tlaku. Z toho lze odvodit vztah pro výpočet rychlosti proudění vzduchu dýzou pomocí naměřených veličin následujícím vztahem.

$$v = \sqrt{\frac{2\kappa r}{\kappa-1} T_0 \left(1 - \frac{T_1}{T_0}\right)} = \sqrt{\frac{2\kappa r}{\kappa-1} T_0 \left(1 - \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right)} \quad (18)$$

κ je Poissonova konstanta a r je měrná plynová konstanta. Rychlost zvuku a se z teploty T_0 vypočítá následujícím vztahem.

$$a = \sqrt{\kappa r T^*} = \sqrt{\frac{2\kappa r}{\kappa+1} T_0} \quad (19)$$

Při výpočtu jsou dále pro vzduch uvažovány hodnoty Poissonovi konstanty $\kappa = 1,4$ a měrné plynové konstanty $r = 287 \text{ J/kgK}$. Na Obr.29 jsou zobrazeny průběhy rychlosti vzduchu v blízkosti kritického průřezu dýzy a rychlost zvuku pro danou teplotu T_0 .

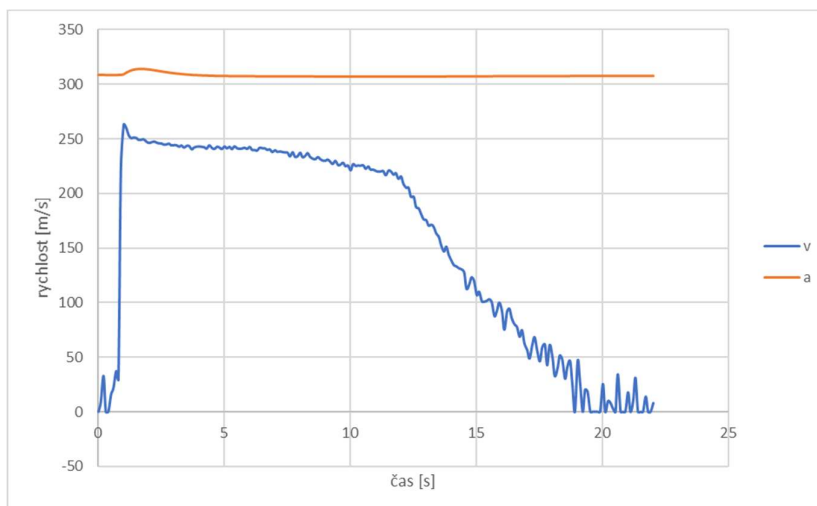
Pro další vyhodnocení je potřeba stanovit hustotu proudícího vzduchu v místě kritického průřezu. Nejdříve se ze stavové rovnice určí hustota v ustalovací nádobě ρ_0 .

$$\rho_0 = \frac{p_0}{T_0 r} \quad (20)$$

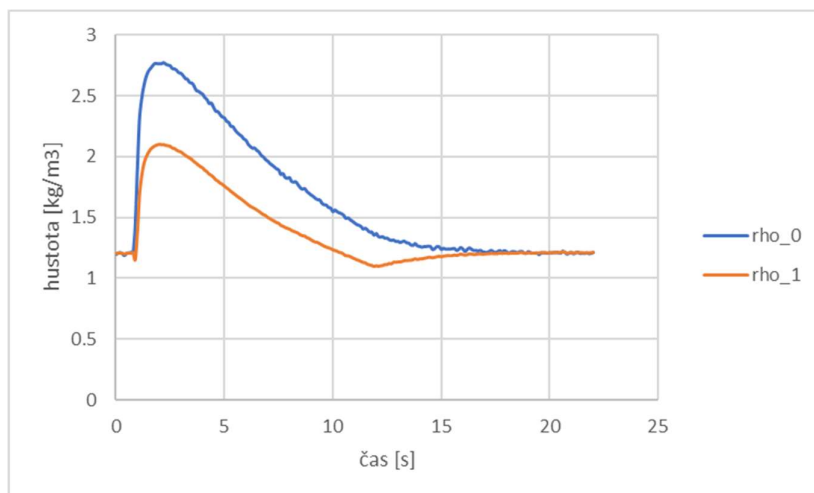
Následně lze ze vztahu pro adiabatickou expanzi vypočítat hustotu v místě kritického průřezu ρ_1 .

$$\rho_1 = \rho_0 \left(\frac{p_0}{p_1}\right)^{\left(\frac{1}{\kappa}\right)} \quad (21)$$

Průběh obou hustot je zobrazen na Obr.30.



Obr.29 Průběh rychlosti v dýze v blízkosti kritického průřezu při prvním měření



Obr.30 Průběh hustot při prvním měření

Tab.2 Hodnoty průměrné rychlosti a hustoty pro jednotlivá měření

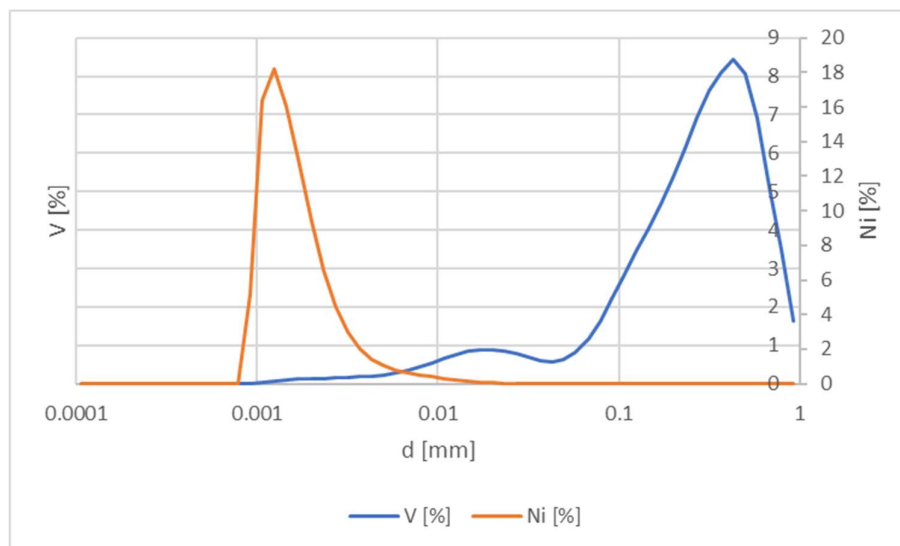
měření	v [m/s]	ρ_1 [kg/m ³]
1	237.86	1.61
2	237.71	1.61
3	238.53	1.62
4	237.41	1.60
5	237.40	1.61
6	237.87	1.64
7	237.68	1.63
8	238.02	1.65
9	237.16	1.60
10	237.78	1.63

Průběh rychlosti vzduchu dýzou v lze rozdělit do tří úseků. V prvním úseku dochází po otevření ventilu k prudkému nárůstu rychlosti. Následně dojde k ustálení rychlosti a k mírnému poklesu. Ve třetím úseku dochází k rychlému poklesu rychlosti do vyrovnání tlaků. Z důvodu, že dýza má velmi dlouhý druhý úsek, a právě v tomto úseku dochází k ustálení vznikajících kapek, je další vyhodnocení prováděno pro tento úsek. V (Tab.2) jsou sepsány průměrné hodnoty rychlosti v a hustoty ρ_1 tohoto úseku.

5.5.2 Spraytec

Při měření se zařízením Spraytec příslušný software vyhodnocuje zeslabení, objemový podíl Cv , Sauterův průměr D_{32} , Debroukerův průměr D_{43} a objemové podíly jednotlivých rozměrů částic. Data jsou zaznamenávána každých 0,4 s. V Tab.3 jsou sepsány naměřené hodnoty prvního měření. Z důvodu velkého množství dat je zde pouze uvedena hodnota objemového podílu pro kapky o průměru 1 – 1.166 μm .

Na následujícím obrázku (Obr.31) je zobrazena závislost objemového podílu V [%] a procentuálního podílu počtu kapek N_i [%] na průměru kapky. Z průběhu objemového podílu je patrné, že v dýze dochází k tvorbě dvou převažujících režimů kapek. Pro další vyhodnocení byly proto rozděleny vznikající kapky podle průměrů do dvou skupin. Skupina malých kapek je uvedena v Tab.4 a skupina velkých kapek v Tab.5. Z podílu počtu kapek vyplývá, že vzniká velké množství menších kapek a menší množství velkých kapek, které jsou ovšem znatelně větší.



Obr.31 Závislost objemového podílu a procentuálního podílu počtu kapek na průměru kapek

Tab.3 Naměřené hodnoty pomocí Spraytecu při prvním měření

Date-Time	Transmission	Cv [%]	D ₃₂ [μm]	D ₄₃ [μm]	V (1.000-1.166μm) [%]
7 Feb 2022 10:40:09.2008	95.47	0.0015	35.43	129	0.09
7 Feb 2022 10:40:12.4008	95.09	0.0024	48.8	130.6	0.03
7 Feb 2022 10:40:12.8008	77.05	0.0119	48.2	131.8	0.06
7 Feb 2022 10:40:13.2008	85.31	0.0116	76.71	257.91	0.04
7 Feb 2022 10:40:13.6008	78.39	0.0209	89.7	271.01	0.03
7 Feb 2022 10:40:14.0008	79.32	0.0134	62.43	263.08	0.05
7 Feb 2022 10:40:14.4008	81.04	0.0363	170.39	473.22	0
7 Feb 2022 10:40:14.8008	65.46	0.0607	145.14	465.61	0.01
7 Feb 2022 10:40:15.2008	79.1	0.0195	88.19	442.09	0.03
7 Feb 2022 10:40:15.6008	82.66	0.012	65.94	395.02	0.03
7 Feb 2022 10:40:16.0008	84.69	0.009	56.1	381.88	0.04
7 Feb 2022 10:40:16.4008	87.07	0.0074	54.91	385.69	0.03
7 Feb 2022 10:40:16.8008	89.55	0.0049	46.23	375.03	0.04
7 Feb 2022 10:40:17.2008	93.73	0.0042	64.97	385.62	0.02

Tab.4 Rozdělení malých kapek

úsek	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>d</i> [μm]	0.108	0.126	0.147	0.171	0.199	0.232	0.271	0.316	0.368	0.430	0.501
úsek	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
<i>d</i> [μm]	0.584	0.681	0.795	0.926	1.080	1.259	1.468	1.711	1.995	2.326	2.712
úsek	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
<i>d</i> [μm]	3.162	3.687	4.299	5.012	5.844	6.813	7.943	9.261	10.794	12.583	14.672
úsek	34	35	36	37	38	39	40	41			
<i>d</i> [μm]	17.105	19.946	23.257	27.115	31.617	36.866	42.984	49.647			

Tab.5 Rozdělení velkých kapek

úsek	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d [μm]	57.885	68.124	79.431	92.612	107.935	125.827	146.719	171.045	199.460	232.566
úsek	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
d [μm]	271.150	316.168	368.662	429.835	501.123	584.277	681.242	794.303	926.116	

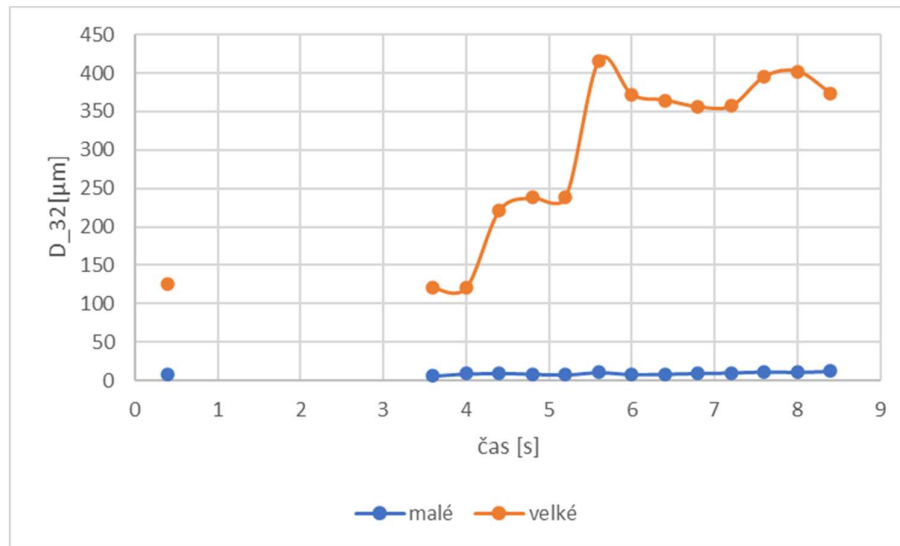
Pro vyhodnocení průměrů kapek je vhodné použít Sauterův průměr D_{32} , který se vypočítá podle následujícího vztahu.

$$D_{32} = \frac{\sum N_i d^3}{\sum N_i d^2} \quad (22)$$

N_i zde značí počet kapek v úseku a vypočítá se podle následujícího vztahu.

$$N_i = \frac{V_i}{\frac{4}{3}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^3} \quad (23)$$

Na Obr.32 je zobrazen průběh D_{32} malých a velkých kapek v průběhu měření.

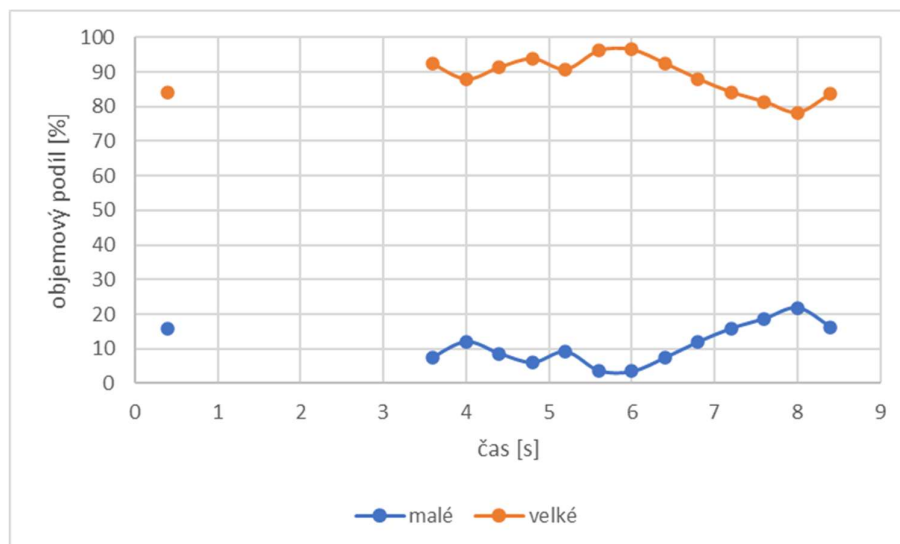


Obr.32 Průběh D_{32} velkých a malých kapek při prvním měření

Objemový podíl malých a velkých kapek je suma objemových podílů jednotlivých průměrů. Průběh objemového podílu je zobrazen na Obr.33.

$$podíl_{malé} = \sum V_{imalé} \quad (24)$$

$$podíl_{velké} = \sum V_{ivelké} \quad (25)$$



Obr.33 Průběh objemového podílu velkých a malých kapek při prvním měření

Následující tabulka (Tab.6) popisuje průměrné hodnoty pro jednotlivá měření. Hodnoty průměrů kapek jsou uvedeny pro časový úsek od 5,6 s do 8,8 s. Tyto hodnoty jsou uvažovány, protože je proud vzduchu již ustálený a zároveň nedochází k zamlžování sklíček, které ovlivňuje naměřené hodnoty.

Tab.6 Stanovené hodnoty pro jednotlivá měření

měření	trans	Cv	D32 [μm]	D43 [μm]	D32 male [μm]	D32 velke [μm]	Podíl male [%]	Podíl velké [%]
1	76.62	0.0086	49.82	353.20	10.28	362.90	24.79	75.21
2	76.32	0.0094	53.34	359.73	9.69	343.58	23.04	76.96
3	76.03	0.0088	47.99	348.63	10.47	358.54	25.66	74.34
4	76.49	0.0079	45.82	336.58	9.86	323.72	25.06	74.94
5	87.30	0.0122	85.52	448.68	10.74	371.62	10.77	89.23
6	85.53	0.0095	58.88	357.22	9.22	271.96	16.56	83.45
7	92.35	0.0050	67.38	392.86	9.24	318.74	11.88	88.13
8	86.00	0.0160	105.46	454.79	8.89	347.37	6.55	93.45
9	93.79	0.0043	74.78	405.96	11.26	306.57	12.59	87.41
10	83.41	0.0197	107.31	432.69	8.27	314.41	5.54	94.47

Weberovo číslo se vypočítá podle následujícího vztahu. Při výpočtu se zanedbává rychlost vznikající kapky, proto se za relativní rychlost dosadí rychlost proudění vzduchu v . σ je povrchové napětí vodní fáze.

$$We = \frac{\rho_1 v^2 D_{32}}{\sigma} \quad (26)$$

Výsledná Weberova čísla jsou uvedena v následující tabulce (Tab.7).

Tab.7 Weberova čísla pro jednotlivá měření

měření	We_malé [-]	We_velké [-]
1	13.01	459.25
2	12.28	435.36
3	13.39	458.51
4	12.38	406.38
5	13.54	468.34
6	11.85	349.81
7	11.85	408.45
8	11.54	450.93
9	14.04	382.14
10	10.61	403.66

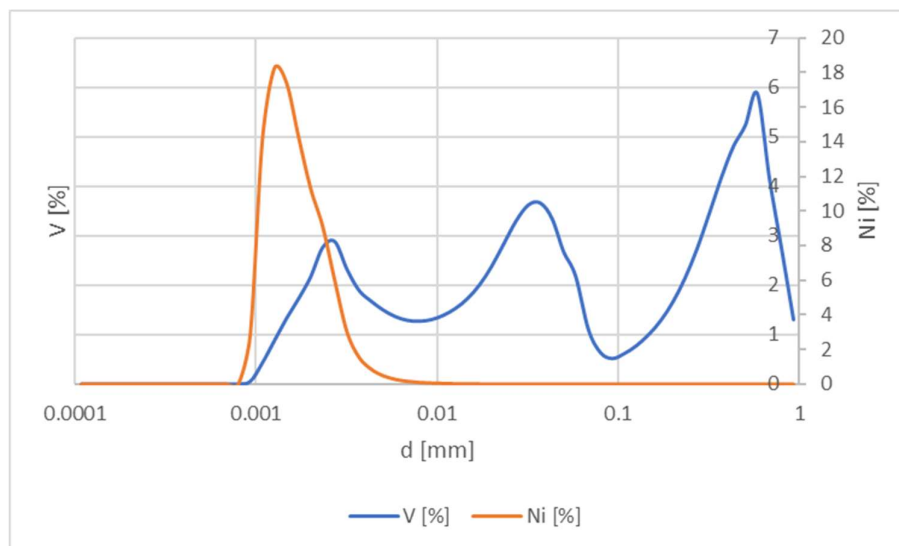
5.6 Zadní sklo

Při měření se starou dýzou lze také Spraytec umístit na snímání zadního průhledítka. Proto bylo provedeno měření se Spraytecem i pro toto umístění. V následující tabulce (Tab.8) jsou uvedeny průměrné hodnoty rychlosti v a hustoty ρ_1 ustáleného stavu dýzy pro jednotlivá měření.

Tab.8 Průměrné hodnoty ustálené rychlosti a hustoty vzduchu v blízkosti kritického průřezu

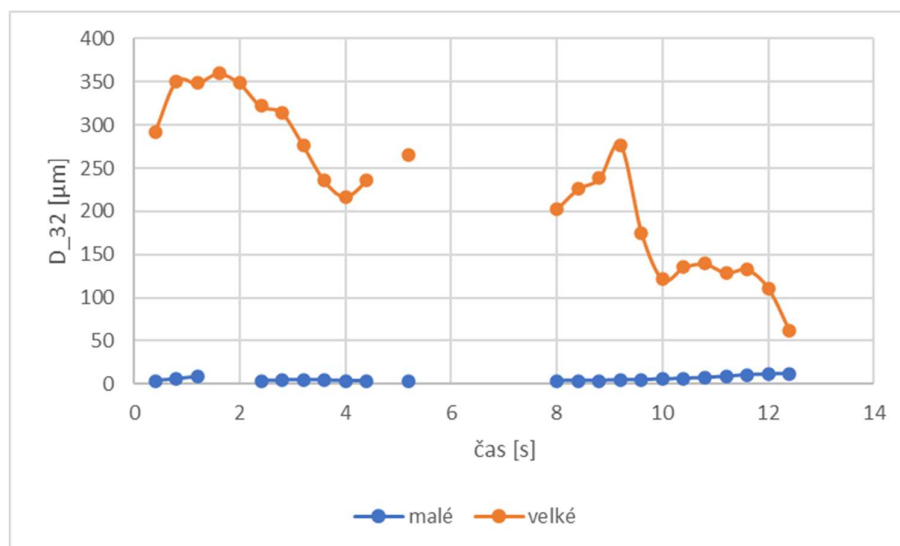
měření	v [m/s]	ρ_{01} [kg/m ³]
1	237.42	1.58
2	238.75	1.60
3	237.94	1.61
4	237.68	1.61
5	237.57	1.61
6	239.09	1.56
7	239.49	1.60
8	238.72	1.59
9	238.98	1.62
10	238.13	1.62

Na následujícím obrázku (Obr.34) je zobrazena závislost objemového a početního podílu na průměru kapek při prvním měření. Z průběhu objemového podílu je patrné, že se výsledek liší od měření na předním průhledítku. I zde je však patrné rozdělení kapek do dvou režimů jako u předního průhledítka.

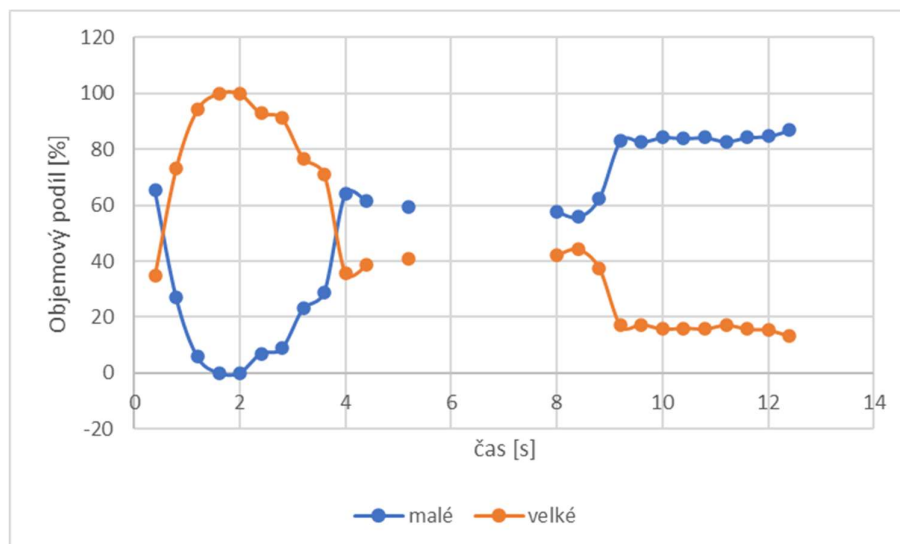


Obr.34 Závislost objemového podílu a procentuálního podílu počtu kapek na průměru kapek

Průběh Sauterova průměru D_{32} velkých a malých kapek je zobrazen na Obr.35. Průběh objemového podílu velkých a malých kapek je zobrazen na Obr.36.



Obr.35 Průběh D_{32} velkých a malých kapek při prvním měření



Obr.36 Průběh objemového podílu velkých a malých kapek při prvním měření

V Tab.9 jsou uvedena Weberova čísla pro malé a velké režimy kapek pro jednotlivá měření.

Tab.9 Weberova čísla pro jednotlivá měření

měření	We_malé [-]	We_velké [-]
1	4.64	275.79
2	6.46	273.02
3	7.45	294.68
4	6.29	336.85
5	6.57	378.68
6	8.42	295.39
7	9.44	255.16
8	9.05	245.00
9	9.04	265.46
10	12.15	221.75

5.7 Vyhodnocení fotogrammetrie

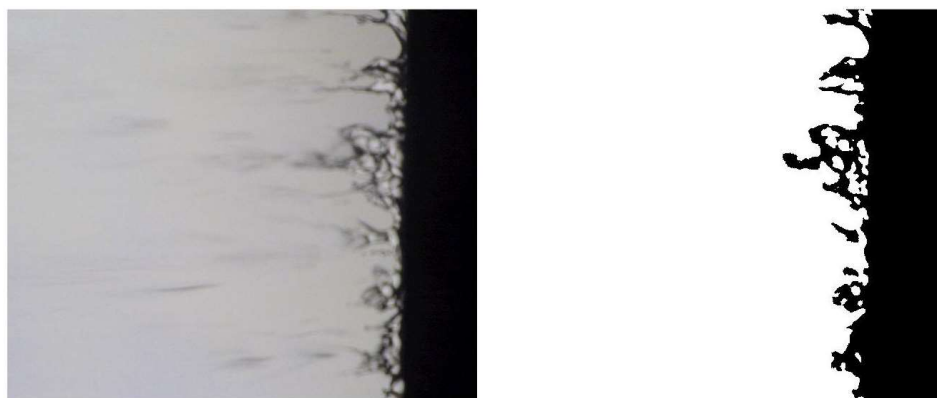
Fotogrammetrie spočívá ve vyhodnocení hrubé vodní disperze ze snímků. Pro vyhodnocení fotogrammetrie je potřeba nejdříve provést segmentaci nasnímaných fotek pro ohraničení vznikajících kapek. K tomu je využit software MATLAB. Na následujícím obrázku (Obr.37) je zobrazen napsaný skript, který byl za tímto účelem vytvořen. Ze zkušeností z minulých měření byla doporučena pro segmentaci funkce aktivní kontury.

```
close all
clear all
clc

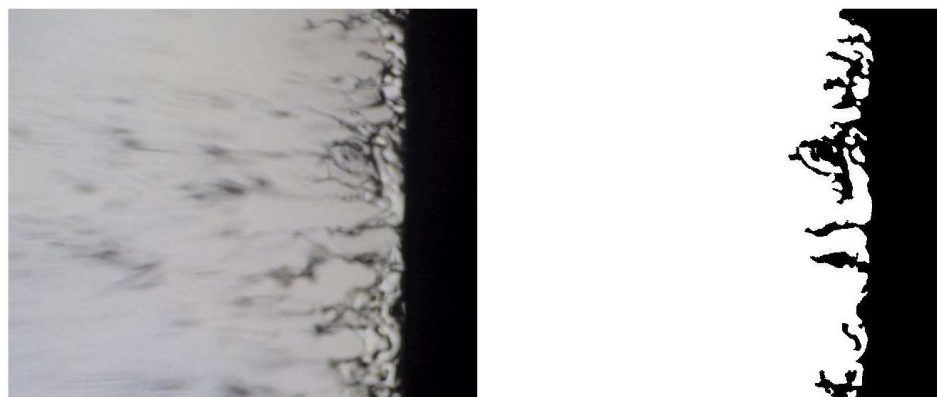
A=imread('C:\Users\Adamh\OneDrive\Dokumenty\Dýza\měření\zasílka-
LYFH5ALC8HTNG3AZ\08.tif');
[x,y,z]=size(A);
mask = zeros(x,y);
mask(1:end,1:2000) = 1;
mask=imresize(mask,0.4);
A=imresize(A,0.4);
bw = activecontour(A,mask,2000);
A = imlocalbrighten(A);
imshowpair(A,bw,'montage')
```

Obr.37 Skript aktivní kontury

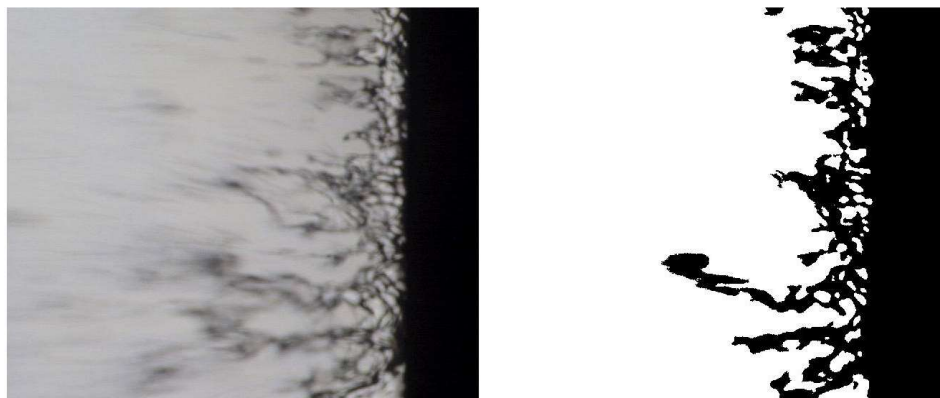
Na následujících obrázcích (Obr.38, Obr.40, Obr.41) jsou nalevo zobrazeny původní snímky a napravo snímky upravené pomocí aktivní kontury. Toto kvalitativní vyhodnocení postačuje k posouzení vhodnosti této varianty dýzy.



Obr.38 Aktivní kontura 1



Obr.39 Aktivní kontura 2



Obr.40 Aktivní kontura 3

5.8 Diskuze výsledků

V této kapitole byl popsán experiment pro měření hrubé vodní disperze a stávající dýza měřící trati. Pro potvrzení a zjištění nedostatků stávající dýzy bylo provedeno kompletní měření pomocí Spraytecu na zadním a předním sklíčku a pomocí kamery byla naznačena možnost vyhodnocení pomocí fotogrammetrie. Objemová distribuce hrubých kapek naznačila dvojitý mód. Proto byly definovány skupiny malých a velkých kapek. Z vypočítaných rychlostí, hustot a z vyhodnocených průměrů kapek byla stanovena Weberova čísla. Průměrné hodnoty Weberova čísla při měření na předním skle vyšly $We_{malé} = 12,54$ a $We_{velké} = 422,28$. Průměrné hodnoty Weberova čísla při měření na zadním skle vyšly $We_{malé} = 7,95$ a $We_{velké} = 284,18$.

Z měření vyplynuly nedostatky tohoto řešení dýzy. Při měření byly pozorovány konstrukční nevýhody, zejména složitá výměna lopatek. Dýza zároveň spíše simuluje oběžnou lopatku a ne rozváděcí, na které v turbíně dochází k hrubé vodní disperzi. Vlivem umístění profilu v kritickém průřezu dýzy dochází k rázovým vlnám. Při vyhodnocení rychlosti proudění vzduchu je znám tlak před umístěným profilem v kritickém průřezu. Kritický průřez ovšem není známý, a proto se při výpočtech uvažuje pouze s přibližnou rychlostí před samotným profilem. V průběhu experimentu docházelo k velkému zamlžení sklíček, které bylo znát především u zadního průhledítka. Proto bylo se Spraytecem nejprve provedeno měření na předním průhledítku, kde nedocházelo k takovému zamlžení. Nevýhodou tohoto umístění ovšem bylo, že se měřilo blízko odtokové hrany a kapky nemusely být ustáleny. Spraytec proto mohl vyhodnotit kapku s nesprávným průměrem. Na zadním průhledítku bylo možné již kapky uvažovat za

ustálené, ale velké zamlžení způsobovalo nepřesnosti při vyhodnocení. To také způsobovalo, že Spraytec v potřebném čase neměřil a z toho okamžiku nebyla zaznamenána žádná data. Pro kompletnější vyhodnocení experimentu by bylo vhodné znát časový průběh množství dávkované vody.

6 Návrh nové dýzy

Následující kapitola se zabývá zhodnocením poznatků z předchozí kapitoly a jejich aplikací za účelem návrhu nové dýzy. Součástí návrhu jsou výpočty, modely v softwaru Autodesk Inventor a výkresová dokumentace, která je uvedena v příloze diplomové práce.

6.1 Cíle

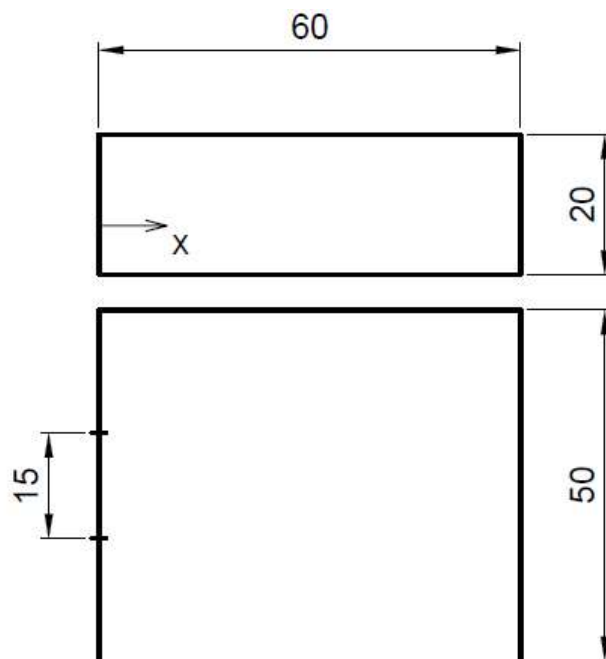
Cíle návrhu vycházejí ze závěrů předcházející kapitoly. Jedná se především o možnost stanovení přesné rychlosti v místě odtokové hrany, zajištění vhodnějšího dávkování vody a vyřešení zamlžování skel. Dýza by také měla odpovídat spíše rozváděcí lopatce a nemělo by docházet k tvorbě rázových vln.

6.2 Návrh nového tunelu

Nový tunel se skládá z dvou přírub o průměru 220 mm s osmi dírami pro šrouby M16. Příruby jsou spojeny dvěma plechy 420x50x20 mm, které jsou od sebe vzdálené 50 mm a tvoří průtočný kanál dýzy s průřezem 50x20 mm. Z každé strany je k plechům přišroubováno plexisklo. Pomocí tohoto uspořádání lze Spraytec umístit v dostatečné vzdálenosti, aby proudící kapky již byly ustálené a zároveň nedocházelo v místě měření k výraznému zamlžení skla.

6.3 Návrh dýzy

Navrhovaná dýza je konvergentní s kritickým průřezem v místě odtokové hrany. Profil ze staré dýzy je zde nahrazen blokem, který je součástí dýzy a tvoří kritický průřez. Proto nedochází k takové tvorbě rázových vln, jako u staré dýzy. Pomocí známého průřezu bude také možné dopočítat rychlost proudění vzduchu přímo v místě odtokové hrany. Součástí návrhu nové dýzy je výpočet tvaru bloku dýzy a jeho následné sestavení. Blok dýzy bude mít odtokovou hranu kolmou na plexisklo. Na Obr.41 a Tab.10 jsou uvedeny základní rozměry polotovaru, ze kterého se následně blok dýzy vyrobí.



Obr.41 Základní rozměry polotovaru pro novou dýzu

Průřez odpovídá průřezu průtočného kanálu. Pro znázornění výpočtu je zavedena souřadnice x na levou stranu půdorysu kvádrů. Šířka zde značí vzdálenost protilehlých částí dýzy. Následující výpočet spočívá ve výpočtu šířky lopatky v závislosti na souřadnici x .

Tab.10 Základní rozměry lopatky pro novou dýzu

Průřez [mm]	Šířka($x=0$) [mm]	Délka [mm]
20 = konst.	15	60

V následující tabulce (Tab.11) jsou shrnuty hodnoty veličin, které byly použity k výpočtu.

Tab.11 Uvažované podmínky výpočtu

K [-]	r [J/kgK]	c_p [J/kgK]	D_0 [m]	p_0 [Pa]	T_0 [K]
1,4	287	1004,5	0,3	300 000	293,15

Z uvažovaných hodnot se následně spočítal průřez $A_0 = \frac{\pi D_0^2}{4} = 0,0707 \text{ m}^2$ a hustota při stagnačním stavu $\rho_0 = \frac{p_0}{rT_0} = 3,5657 \text{ kg/m}^3$. Následně se provedly výpočty kritické rychlosti a^* , hustoty ρ^* , průtoku m^* , teploty T^* a tlaku p^* .

$$a^* = \sqrt{\frac{2}{\kappa+1} \kappa r T_0} = 313,3 \text{ m/s} \quad (27)$$

$$\rho^* = \rho \left(1 + \frac{\kappa-1}{2}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}} = 2,260 \text{ kg/m}^3 \quad (28)$$

$$m^* = a^* \rho^* \cdot A^* = 0,053 \text{ kg/s} \quad (29)$$

$$T^* = T_0 \left(\frac{2}{\kappa+1}\right) = 244,3 \text{ K} \quad (30)$$

$$p^* = p_0 \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 158,5 \text{ kPa} \quad (31)$$

Rychlost v stagnačním stavu se následně vypočítá jako: $v_0 = \frac{m^*}{A_0 \rho_0} = 0,211 \text{ m/s}$. Pro veličiny pro $x = 0$ platí, že v tomto bodě nastává kritický stav a platí:

$$v(x = 0) = a^* \quad (32)$$

$$A(x = 0) = \text{Šířka}(x = 0) \cdot \text{Průřez} \quad (33)$$

$$\rho(x = 0) = \rho^* \quad (34)$$

$$p(x = 0) = p^* \quad (35)$$

$$m = v(x = 0) \cdot \rho(x = 0) \cdot A(x = 0) \quad (36)$$

Pro veličiny pro $x > 0$ následně platí:

$$p(x > 0) = p(x_{i+1}) - \frac{p(x=0) - p_0}{30} \quad (37)$$

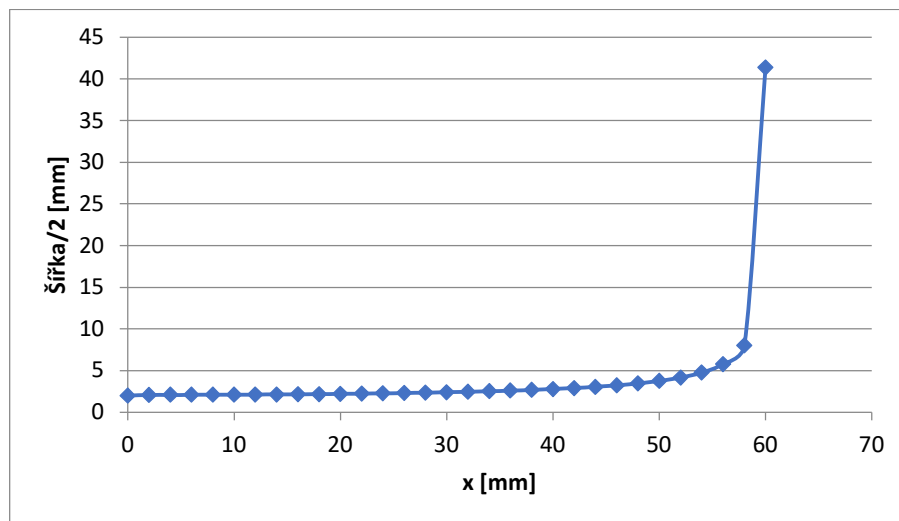
$$\rho(x > 0) = \rho_0 \left(\frac{p(x>0)}{p_0}\right)^{\frac{1}{\kappa}} \quad (38)$$

$$v(x > 0) = \sqrt{2T_0 r \frac{\kappa}{\kappa-1} \left(1 - \left(\frac{p(x>0)}{p_0}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}\right)} \quad (39)$$

$$v(x = \text{max}) = 10 \text{ m/s} \quad (40)$$

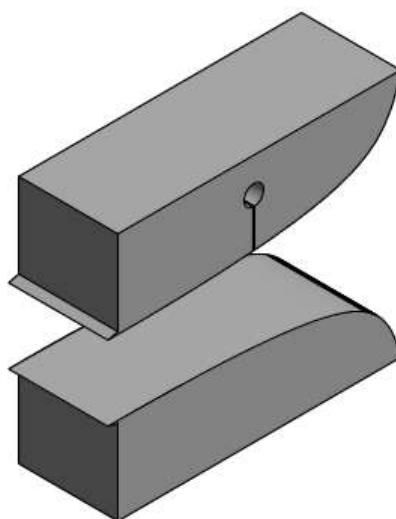
$$A(x > 0) = \frac{m}{v(x>0)\rho(x>0)} \quad (41)$$

Na následujícím obrázku (Obr.42) je zobrazen graf s průběhem poloviny šířky v závislosti na souřadnici x až do vzdálenosti $x = \text{Délka}$. Soubor s těmito souřadnicemi byl následně nahrán do softwaru Inventor. Zde byla vymodelována dýza podle požadovaných rozměrů.



Obr.42 Průběh šířky v závislosti na vzdálenosti x

Výsledný model dýzy je zobrazen na následujícím obrázku (Obr.43). Skládá se ze dvou bloků. Horní blok je opatřen kanálkem pro dávkování vody. Odtokové hrany obou bloků dýzy jsou zkosené z důvodu příznivějšího odtékání vody, které zabraňuje shlukování vody pod odtokovou hranou.



Obr.43 Model navržené dýzy

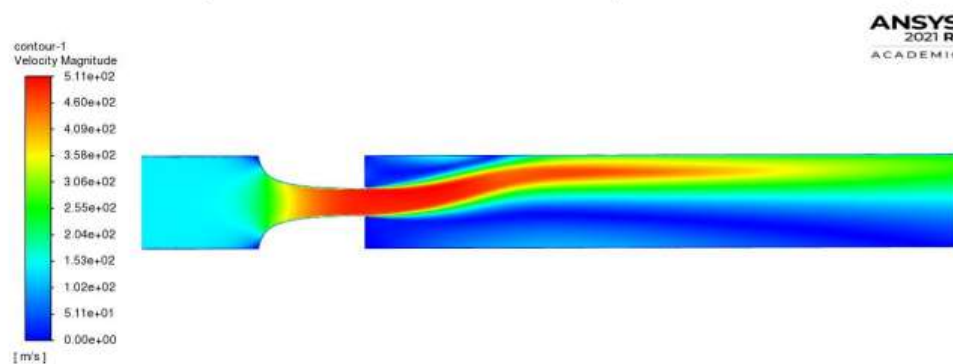
Následující obrázek (Obr. 44) zobrazuje celkový model návrhu nové dýzy.



Obr.44 Model tunelu s novou dýzou

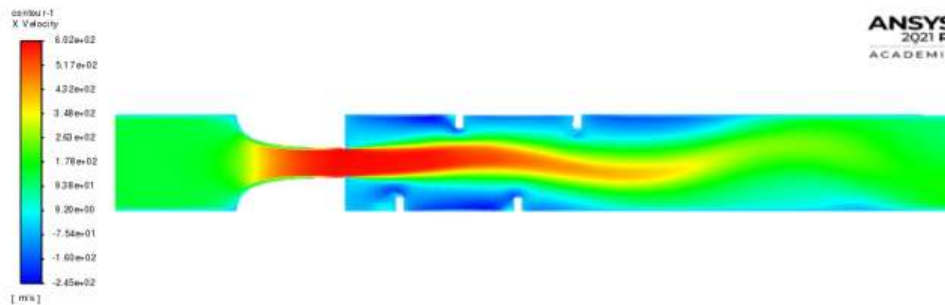
6.4 Žebrování

Na navržené nové dýze bylo provedeno v rámci diplomové práce studentů ze Skotska měření na dýze s cílem simulace proudění v dýze a její experimentální ověření. Při simulaci v CFD softwaru se ukázalo, že za odtokovou hranou v horní části vzniká oblast s nižším tlakem než ve středu a v dolní části. To způsobuje stáčení proudu vzduchu směrem k horní části dýzy. Na Obr.45 je zobrazen průběh rychlosti vzduchu v dýze. [22]



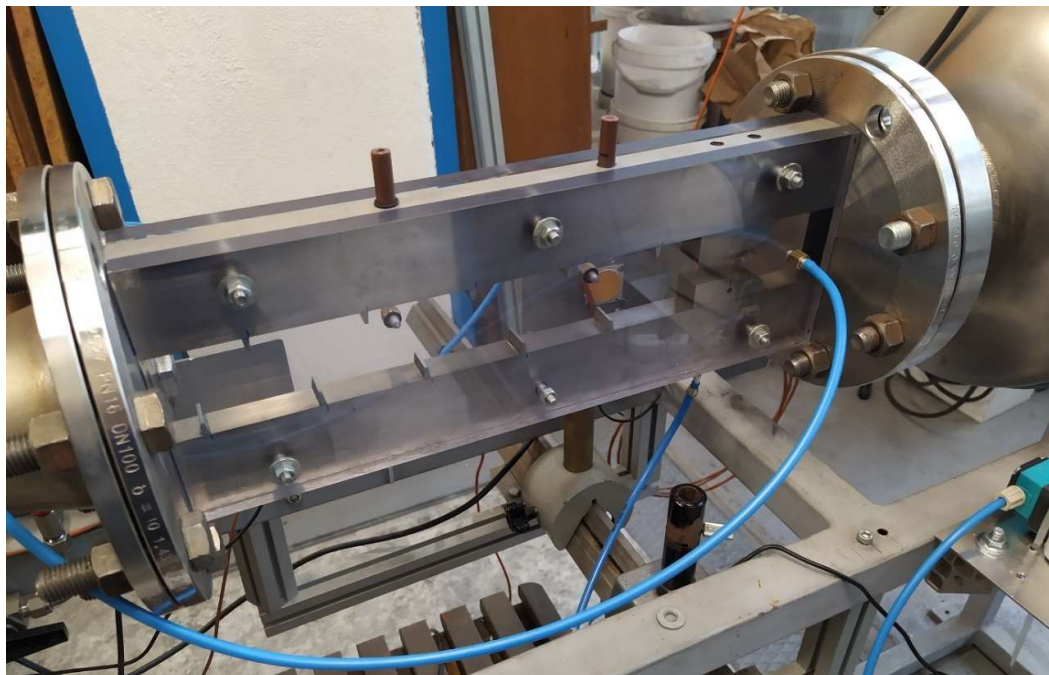
Obr.45 CFD simulace rychlosti v dýze [22]

Z toho důvodu byla použita žebra s účelem usměrnění maximální rychlosti proudění směrem ke středu dýzy. Na Obr.46 je zobrazen příklad rozložení rychlosti při využití žeber. [22]



Obr.46 CFD simulace rychlosti v dýze se žebry [22]

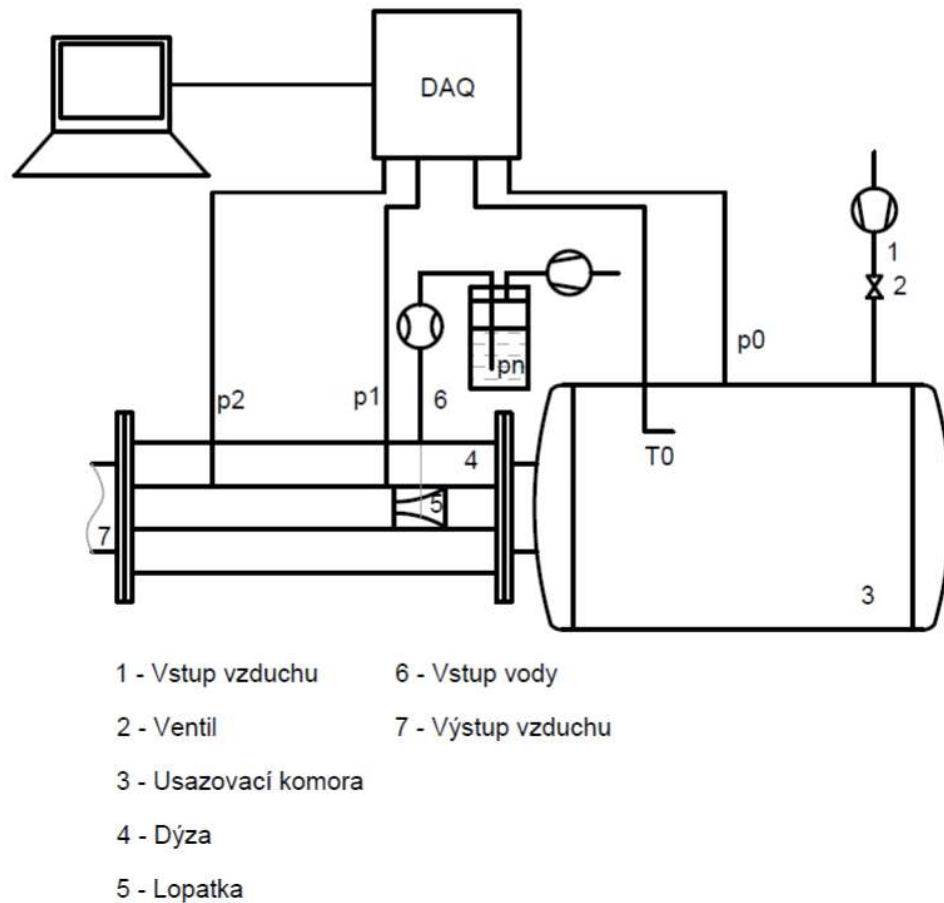
Následně byla dýza opatřena několika žebry a na Obr.47 je zobrazena zapojená do měřicí trati.



Obr.47 Zapojení nové dýzy do měřicí tratě

6.5 Dávkování vody

Součástí návrhu nové experimentální trati pro měření rozpadu vodních filmů na lopatkách parních turbín je návrh dávkování vody do dýzy. U původního uspořádání byl znám pouze celkový dodaný objem vody. Cílem nového uspořádání je oproti předchozímu řešení zajistit časový průběh jejího průtoku. Na Obr.48 je zobrazeno schéma měřicí trati včetně nového dávkování vody.



Obr.48 Schéma měřicí trati

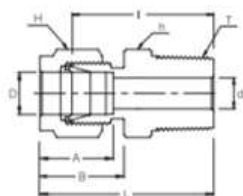
Návrh dávkování vody do dýzy zahrnuje výkres tlakové nádoby a volbu průtokoměru. Tlaková nádoba zde slouží ke zmenšení nerovnoměrnosti proudu za kompresorem, který stlačuje vzduch do nádoby, ze které následně odtéká voda do průtokoměru a následně do

dýzy. Nádoba je opatřena vodoznakem pro kontrolu výšky hladiny. Model nádoby je zobrazen na Obr.49. Nádoba má dva otvory pro zavedení spojek a jeden otvor pro nalévání vody do nádoby.

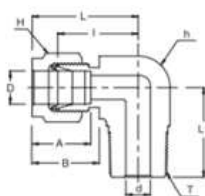


Obr.49 Model navržené tlakové nádoby

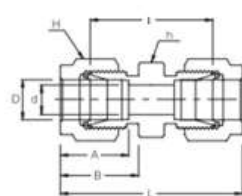
Pro propojení nádoby s trubkami byla z katalogu firmy Superlok vybrána spojka SMC-6M-4R a na Obr.50 jsou vypsány její rozměry. Pro vodoznak byla využity spojky SME-6M-4R a pro propojení dvou trubek byla vybrána spojka SU-6M. Rozměry těchto spojek jsou uvedeny na Obr.51 a Obr.52. Všechny tři spojky jsou určeny pro trubky s vnějším průměrem šest milimetrů.



Obr.50 Spojka SMS-6M-4R [23]



Obr.51 Spojka SME-6M-4R [23]



Obr.52 Spojka SU-6M [23]

6.6 Průtokoměry

Následující část práce se zabývá používanými průtokoměry kapalin a volbou průtokoměru pro podmínky dané měřicí tratě. Lineární průtokoměry kapalin lze rozdělit podle toho, zda při měření průtoku dochází k narušování měřeného proudu, na nerušivé a rušivé. Mezi nerušivé průtokoměry patří například Coriolisův průtokoměr, magnetický průtokoměr nebo ultrasonický průtokoměr. Do skupiny rušivých průtokoměrů patří turbínový průtokoměr, lopatkový průtokoměr nebo vírové průtokoměry. Průtokoměry jsou nejčastěji založeny na způsobu měření hmotnostního průtoku nebo objemového průtoku. Přepočítání z jednoho průtoku na druhý lze potom provést přes hustotu měřené kapaliny. Výhodou hmotnostních průtokoměrů je, že měření není ovlivňováno změnou hustoty. Další způsob měření průtoku je měření rychlosti proudu. [24][25]

Různých průtokoměrů je mnoho a pro konkrétní aplikaci je potřeba průtokoměry vybírat podle konkrétních vlastností. Mezi hlavní faktory patří cena, přesnost, maximální dovolený tlak a teplota, minimální a maximální průtok, typ kapaliny a průměr trubky. [24] Přesnost průtokoměrů lze vyjádřit několika charakteristikami. Rozsah průtokoměru vyjadřuje dovolené hodnoty průtoku, při kterém je dodržena tolerance přesnosti. Většinou je vyjádřena poměrem $a:1$, kde a vyjadřuje poměr největšího průtoku ku nejmenšímu průtoku. Linearita vyjadřuje odchylku od specifické přesnosti v daném rozsahu průtokoměru. Opakovatelnost vyjadřuje, jak moc se liší výsledky měření za stejných podmínek provedené v krátkém časovém úseku za sebou. Hystereze vyjadřuje odlišnost naměřené hodnoty, pokud požadovaný průtok dosáhneme navýšením z nižšího průtoku oproti snížení z vyššího průtoku. [24]

6.6.1 Nerušivé průtokoměry

Mezi nerušivé průtokoměry, které nenarušují měřený proud, patří několik typů. V následujících podkapitolách jsou sepsány informace o vybraných typech průtokoměrů této skupiny.

6.6.1.1 Coriolisův průtokoměr

Coriolisův průtokoměr přímo měří hmotnostní průtok a lze tedy s jeho pomocí měřit většinu tekutin a plynů. Způsob měření je založen na coriolisovém efektu způsobeném rotací Země. Princip měření hmotnostního průtoku je, že trubka je uměle rozkmitávána

a při průtoku kapaliny dojde ke změně kmitu. Fázový rozdíl mezi kmitáním bez průtoku a s průtokem je potom úměrný hmotnostnímu průtoku kapaliny. Výhodou tohoto průtokoměru je, že u tekutin je také možné přímo měřit jejich hustotu, která je přímo úměrná změně vlastní frekvence. [24][26][27]

Coriolisův průtokoměr lze většinou použít pro trubky od jednotek milimetrů do přibližně 150 mm. Dalšími výhodami jsou zejména vysoká přesnost, vysoká opakovatelnost, nízké náklady na údržbu, použití při vysokých tlacích a použití i při nízkých průtocích. Nevýhodami jsou cena pořízení, náchylnost vůči vibracím z okolí a nečistoty způsobující nepřesnost ve stanovení hustoty. [24][26]

6.6.1.2 Magnetický průtokoměr

Magnetický průtokoměr lze použít u vodivých tekutin. Indukované napětí je úměrné rychlosti proudící tekutiny v trubce. Hustota a viskozita tedy přímo neovlivňují fungování průtokoměru. Další výhodou je, že vlivem měření magnetickým průtokoměrem nedochází k tlakovým ztrátám. Nevýhodou je vysoká cena provozu. [24]

6.6.1.3 Ultrazvukové průtokoměry

Ultrazvukové průtokoměry jsou skupina průtokoměrů, které měří průměrnou rychlost pomocí ultrazvukového signálu. Signál je buďto změněn nebo odražen proudící měřenou látkou. Podle toho se ultrazvukové průtokoměry dělí na Dopplerovy průtokoměry a průtokoměry vyhodnocující dobu, kterou signál prochází. U Dopplerova průtokoměru se ultrazvukový signál odráží od částic v médiu a změna frekvence je přímo úměrná průměrné rychlosti těchto částic. Tento typ průtokoměrů se většinou využívá pro měření průtoků plynů. Výhodou je že nedochází k tlakovým ztrátám a průtokoměry mají využití v širokém rozpětí průměrů trubek a průtoků. Nevýhodou je cena zařízení i vysoká cena provozu. [24][26]

6.6.2 Rušivé průtokoměry

Rušivé průtokoměry při měření průtoku narušují proud. V následujících podkapitolách jsou popsány některé vybrané typy těchto průtokoměrů.

6.6.2.1 Positive displacement

Positive displacement průtokoměry se mohou používat u kapalin i plynů. Základním principem jejich funkce je zachycení části proudící tekutiny do oblasti se známým objemem a následné uvolnění zpět do proudu. Průtok se potom zjistí počtem zachycení za určitý čas. Pro zachování co největší plynulosti proudění je v průtokoměru několik paralelních objemů, kde se některé naplňují a některé vyprazdňují. Jedním z typů positive displacement průtokoměrů je průtokoměr se dvěma oválnými koly, které se vlivem proudění otáčejí. Další varianty mohou například využívat písty. Positive displacement metry mají široký rozsah průtoků a velikou přesnost. Jelikož tento typ rušivých průtokoměrů není založen na měření rychlosti proudící tekutiny, není zde nebezpečí nepřesnosti důsledkem vířivosti proudění a dochází k minimálním tlakovým ztrátám. Pokud se používá tekutina, u které by hrozilo ucpání průtokoměru, je vhodné před průtokoměr umístit pojistné přemostění. [24][26]

6.6.2.2 Turbínové průtokoměry

Turbínové průtokoměry se používají pro měření průtoku plynů i kapalin. Axiální turbínou proudí pracovní látka, která roztáčí rotor turbíny. Otáčky turbíny jsou potom přímo úměrné rychlosti proudění. Výhodou tohoto průtokoměru je vysoká přesnost v lineární oblasti a je vhodný pro použití čistých tekutin s plynulým prouděním. Kvůli tomu, že je průtokoměr založen na měření rychlosti proudění dochází k nepřesnostem vlivem narušování proudění. Proto je vhodné, aby před a za průtokoměrem byl dostatečně dlouhý přímý úsek trubek. Turbínové průtokoměry jsou vhodné pro tekutiny s nízkou kinetickou viskozitou a pro různé viskozity je vhodné provádět nové kalibrace. Minimální měřitelný průtok je ovlivněn linearitou kalibrační křivky. Při malých průtocích není zanedbatelné tření rotoru a ložisek, a proto kalibrační křivka není lineární. S narůstajícím průtokem je tření zanedbatelné a kalibrační křivka je lineární. Maximální měřitelný průtok je ovlivněn tlakem, teplotou a maximálními otáčkami rotoru. [24][26]

6.6.2.3 Lopatkové průtokoměry

Lopatkové průtokoměry jsou založeny na principu měření rychlosti průtoku. Proud tekutiny otáčí lopatkovým kolem a sensory detekují jeho rotaci a vysílají signál odpovídající rychlosti proudění. Oproti turbínovým průtokoměrům jsou jednodušší, levnější a jsou vhodné pro menší průtoky. Další výhodou je, že dochází k nízkým

tlakovým ztrátám. Průtokoměr měří rychlost proudění pouze v malé oblasti blízko vnitřního průměru potrubí. Proto se provádí kalibrace na průměrný průtok po celém průřezu trubky. Pro zabránění výrazné asymetrii proudění v blízkosti průtokoměru je vhodné, aby před vstupem tekutiny do průtokoměru bylo potrubí přibližně deset jeho průměrů přímé a za průtokoměrem pět průměrů. [24][26]

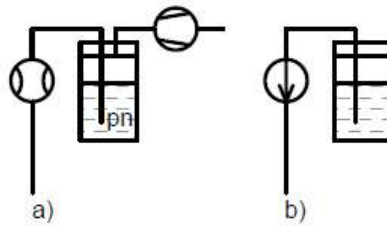
6.7 Výběr průtokoměru

Při dávkování vody do dýzy se objemový průtok vody pohybuje v rozmezí 1 – 10 ml/min. U průtokoměrů, které jsou založeny na principu hmotnostního průtoku je potřeba objemový průtok dopočítat přes hustotu tekutiny. Při uvažování hustoty $\rho_v = 997 \text{ kg/m}^3$ odpovídá požadované rozmezí objemového průtoku hmotnostnímu průtoku 60 – 600 g/h. V následující tabulce (Tab.12) jsou sepsány informace o nalezených průtokoměrech s požadovaným průtokem.

Tab.12 Zvolené průtokoměry a jejich parametry

Název	Typ	Průtok	Tlak [bar]	Přesnost [%]
MINI CORI-FLOW CM13	Coriolisův Průtokoměr	50-2000 g/h (1-20 g/h)	200	±0,2
LIQUI-FLOW L23	Thermal	100-1000 g/h (2-20 g/h)	100	±1
FPW10	Lopátkový	0,3-6 m/s	25	±5
VZS-003-ALU	Positive displacement	1-300 ml/min	30	±1
HPC	Coriolisův Průtokoměr	0-20000 g/h	400	±0,1

Z důvodu velmi malých průtoků experimentální trati jsou vybrané průtokoměry velmi drahé. Proto bylo při následném měření využito zapojení s čerpadlem. Na Obr.53 jsou nakresleny obě varianty. U varianty a) kompresor stlačuje vzduch do nádoby s vodou, ze které následně proudí voda do průtokoměru. Při zapojení b) čerpadlo nasává vodu z otevřené nádoby.



- a) Varianta s kompresorem a průtokoměrem
 b) Varianta s čerpadlem

Obr.53 Varianty dávkování vody do dýzy

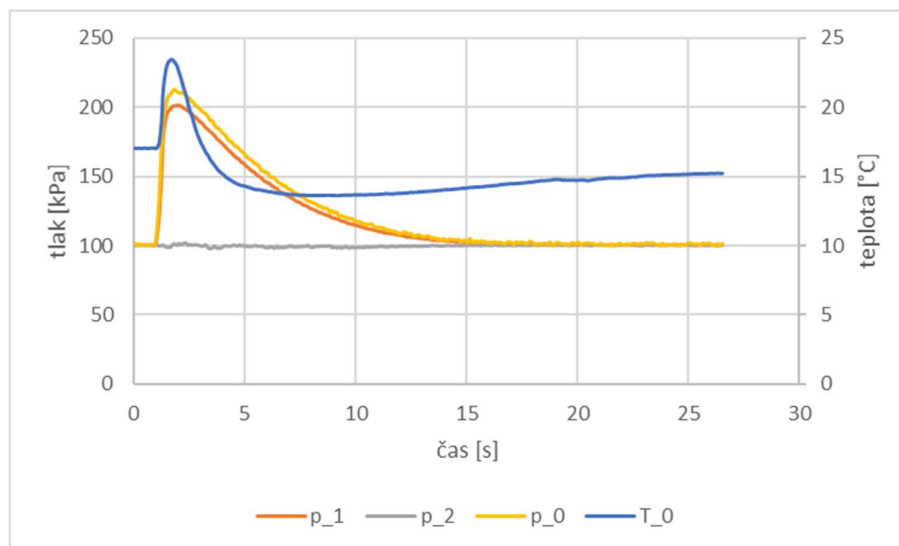
Nádoba na dávkování vody (Obr.54) slouží jako zásobník vody a je opatřena vodoznakem pro kontrolu množství vody v nádobě. Je opatřena spojkami pro připojení hadiček, vypouštěcí armaturou a napouštěcí armaturou. V případě zapojení dávkování vody s kompresorem lze nádobu uzavřít pro umožnění zvýšení tlaku uvnitř nádoby.



Obr.54 Nádoba na dávkování vody

6.8 Měření na nové dýze

Na následujícím obrázku je zobrazen průběh tlaků a teplot v průběhu druhého měření na nové dýze. Obdobně jako u staré dýzy T_0 značí teplotu vzduchu v ustalovací nádobě, p_0 značí tlak v ustalovací nádobě, p_1 značí tlak v blízkosti kritického průřezu a p_2 značí tlak za kritickým průřezem. Z průběhu tlaků je patrné, že nedochází k tvorbě rázových vln, což byl jeden z hlavních důvodů návrhu nové dýzy.



Obr.55 Průběh tlaků a teploty při měření na nové dýze

Oproti staré dýze lze u nové dýzy stanovit rychlost vzduchu přímo v místě odtokové hrany, která se nachází v místě kritického průřezu. Nejprve se stanoví rychlost proudění v místě měření tlaku p_1 obdobně jako u staré dýzy.

$$v = \sqrt{\frac{2\kappa r}{\kappa-1} T_0 \left(1 - \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right)} \quad (42)$$

Pokud je proudění nadkritické, stanoví se rychlost proudění jako rychlost zvuku.

$$a = \sqrt{\frac{2\kappa r}{\kappa+1} T_0} \quad (43)$$

Při podkritickém proudění je využita rovnice kontinuity mezi místem měření tlaku p_1 a místem odtokové hrany.

$$Av\rho_1 = A_k w_L \rho_L \quad (44)$$

V této rovnici je neznámá rychlost v místě odtokové hrany w_L a hustota vzduchu v místě odtokové hrany ρ_L . Proto je k výpočtu rychlosti ještě využita následující rovnice.

$$w_L = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} T_0 \left(1 - \left(\frac{p_L}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right)} \quad (45)$$

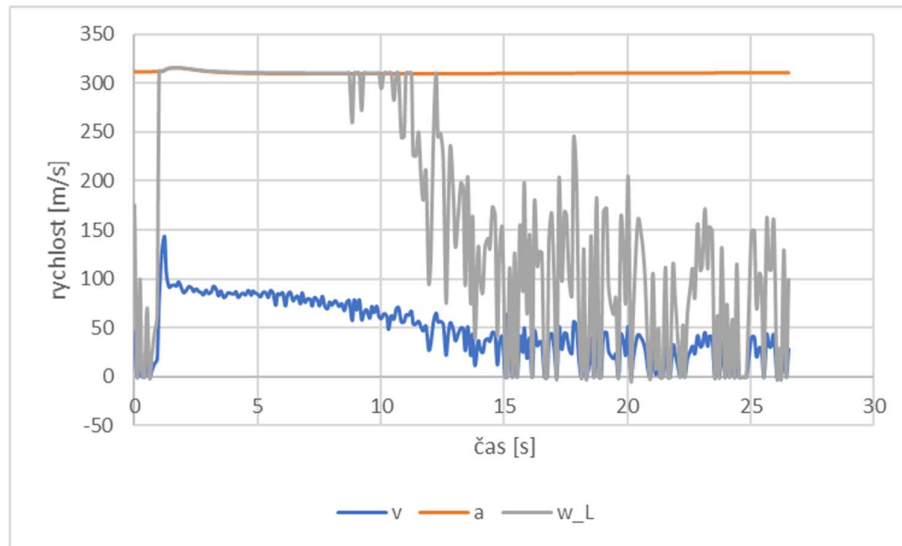
Ke stanovení neznámých veličin byla využita iterace, kdy se nejprve odhadl tlak p_L . Následně se dosadil do upraveného vztahu rovnice kontinuity pro výpočet rychlosti w_L .

$$w_L = \frac{A}{A_k} v \left(\frac{p_1}{p_L} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \quad (46)$$

Rychlost w_L se dosadila do upravené St. Venantovi rovnice a následně tlak p_L znovu do rovnice kontinuity.

$$p_L = p_0 \left(1 - \frac{w_L^2 \kappa - 1}{2 \kappa r T_0} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (47)$$

Průběh rychlostí je zobrazen na následujícím obrázku (Obr.56).

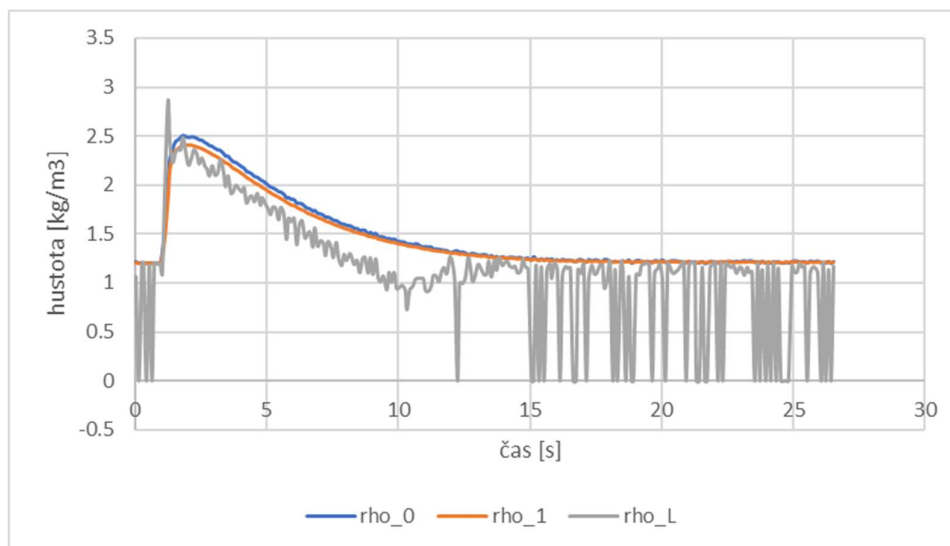


Obr.56 Průběh rychlosti v blízkosti kritického průřezu při měření na nové dýze

Hustoty ρ_0 a ρ_1 se stanoví jako u staré dýzy. Hustota v místě odtokové hrany ρ_L se určí z rovnice kontinuity.

$$\rho_L = \rho_1 \frac{A}{A_k} \frac{v}{w_L} \quad (48)$$

Průběhy jednotlivých hustot jsou zobrazeny na Obr.57.



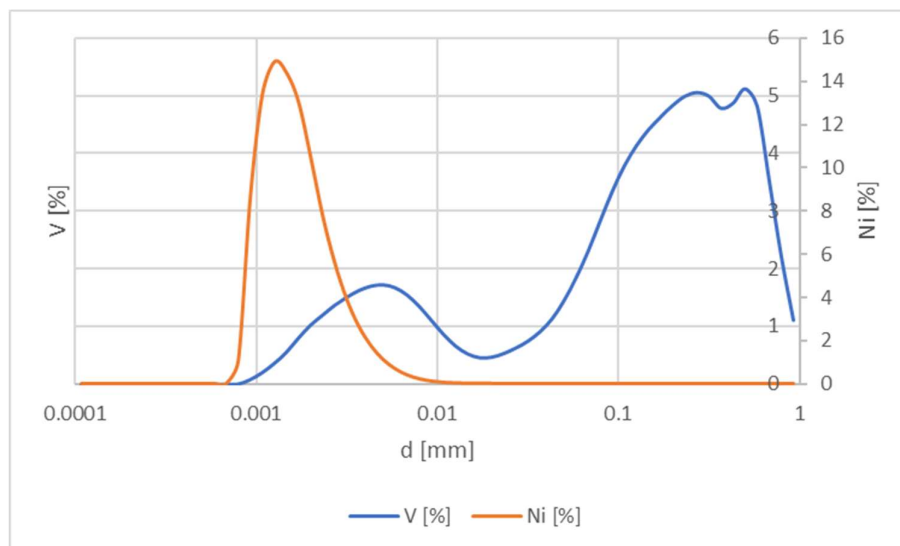
Obr.57 Průběh hustot při měření na nové dýze

Průměrné hodnoty rychlosti a hustoty vzduchu v kritickém průřezu v ustáleném stavu jsou shrnuty v Tab.13.

Tab.13 Průměrné hodnoty ustálené rychlosti a hustoty vzduchu v blízkosti kritického průřezu

měření	w_L [m/s]	ρ_L [kg/m ³]
1	311.75	1.84
2	309.71	1.66
3	306.43	1.75
4	308.67	1.73
5	307.47	1.70
6	304.78	1.69
7	309.59	1.77

Měření se Spraytecem bylo provedeno za odtokovou hranou lopatky přibližně uprostřed dýzy. Na následujícím obrázku (Obr.58) je zobrazena závislost objemového a početního podílu na rozměru kapky při druhém měření. Průměrné vypočítané hodnoty jsou shrnuty v Tab.14.



Obr.58 Závislost objemového podílu a procentuálního podílu počtu kapek na průměru kapek

Tab.14 Stanovené hodnoty pro jednotlivá měření

měření	trans	Cv	D32 [μm]	D43 [μm]	D32 malé [μm]	D32 velké [μm]	Podíl malé [%]	Podíl velké [%]
1	63.53	0.0022	5.97	46.34	3.51	85.78	58.24	41.76
2	72.44	0.0083	30.01	146.69	4.36	152.40	44.25	55.75
3	70.15	0.0129	45.08	204.99	4.96	179.74	32.18	67.82
4	59.67	0.0086	22.03	105.00	4.61	131.58	52.17	47.83
5	67.36	0.0121	38.60	198.04	5.47	183.38	37.49	62.51
6	61.39	0.0146	42.46	186.84	5.04	153.41	49.22	50.78
7	72.00	0.0150	59.11	238.45	6.01	199.82	29.41	70.60

Při výpočtu Weberova čísla je opět zanedbána rychlost vznikajících kapek.

$$We = \frac{D\rho_L W_L^2}{\sigma} \quad (49)$$

V následující tabulce (Tab.15) jsou shrnuta Weberova čísla pro jednotlivá měření.

Tab.15 Weberova čísla pro jednotlivá měření

měření	We_malé	We_velké
1	8.72	213.04
2	9.65	337.18
3	11.33	410.75
4	10.57	301.63
5	12.21	408.98
6	11.02	335.39
7	14.15	470.22

Dále bylo provedeno měření pomocí kamery pro možnost vyhodnocení kapek pomocí fotogrammetrie. Na následujících obrázcích (Obr.59, Obr.60, Obr.61) jsou zobrazeny příklady aktivní kontury pro novou dýzu.



Obr.59 Aktivní kontura pro novou dýzu 1



Obr.60 Aktivní kontura pro novou dýzu 2



Obr.61 Aktivní kontura pro novou dýzu 3

6.9 Diskuze výsledků

V této kapitole byl proveden návrh nové dýzy při využití poznatků z měření na staré dýze. Součástí návrhu je tunel, dýza a nové dávkování vody do dýzy. Dále bylo provedeno kompletní měření na nové dýze pomocí Spraytecu a kamery. Obdobně jako u staré dýzy lze hmotnostní podíl hrubých kapek rozdělit na velké a malé. Průměrné Weberovo číslo malých kapek vyšlo $We_{malé} = 11,09$ a velkých kapek $We_{velké} = 353,88$.

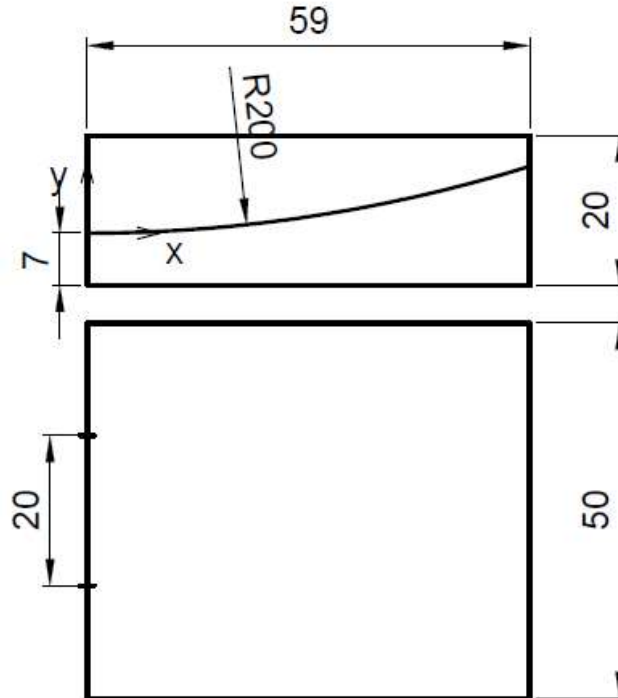
Při měření na nové dýze docházelo ke znatelně menšímu zamlžení sklíček. To vedlo k menším nepřesnostem při měření se Spraytecem. Zároveň bylo možné umístit Spraytec do dostatečné vzdálenosti od odtokové hrany, aby bylo možné kapky považovat za ustálené. Známý průřez umožnil stanovení rychlosti proudění vzduchu přímo v místě odtokové hrany dýzy. Tento návrh tedy splnil stanovené cíle z úvodu této kapitoly. Při měření s kamerou ovšem bylo obtížné zaostřit kameru tak, aby bylo možné zaměřit vznikající kapky. Problém byl, že odtoková hrana směřovala ve stejném směru, jako osa objektivu kamery. Zároveň to způsobilo, že výsledné snímky neobsahovaly vznikající kapky v celé délce odtokové hrany jako u původní dýzy. Z toho důvodu by bylo vhodné dýzu upravit tak, aby bylo možné vyhodnocovat fotogrammetrii jako u původní dýzy.

7 Finální verze dýzy

Kapitola je zaměřena na finální návrh dýzy, který vychází z dýzy z předchozí kapitoly s cílem umožnit vyhodnocení fotogrammetrie jako u staré dýzy. Dýza využije stejný tunel, jako dýza z předchozí kapitoly. Cílem návrhu je otočit odtokovou hranu o devadesát stupňů tak, aby umístění odpovídalo profilu původní dýzy.

7.1 Návrh dýzy

V podkapitole je proveden návrh dýzy. Dýza je vyrobena z polotovaru 59x50x20, který je vykreslen na následujícím obrázku (Obr.62) společně se základními vstupními rozměry.



Obr.62 Základní rozměry nové lopatky

Následující tabulka Tab.15 shrnuje základní rozměry pro návrh nové lopatky.

Tab.16 Základní rozměry nové lopatky

r [mm]	Výška(x=0) [mm]	Šířka(x=0) [mm]	Délka [mm]
200	7	20	59

Oproti výpočtu předchozí lopatky je zde zavedena souřadnice y , která má počátek v půdorysu 7 mm od hrany. Lopatka je sestavená tak, že ve směru souřadnice y je řez kružnicí o poloměru $r = 200 \text{ mm}$. Závislost souřadnice y na souřadnici x je potom určena následující rovnicí.

$$y(x) = r \cdot \left(1 - \cos \left(\arcsin \left(\frac{x}{r} \right) \right) \right) \quad (50)$$

Při znalosti $y(x)$ lze definovat: $Výška(x) = Výška(x = 0) + y(x)$. V následující tabulce jsou sepsány podmínky, pro které je výpočet lopatky proveden.

Tab.17 Uvažované podmínky výpočtu

K [-]	r [J/kgK]	c_p [J/kgK]	D_0 [m]	p_0 [Pa]	T_0 [K]
1,4	287	1004,5	0,3	250 000	293,15

Následně se vypočítá průřez $A_0 = \frac{\pi D_0^2}{4} = 0,0707 \text{ m}^2$ a hustota při stagnačním stavu $\rho_0 = \frac{p_0}{rT_0} = 2,971 \text{ kg/m}^3$. Kritická rychlost a^* , hustota ρ^* , průtok m^* , teplota T^* a tlak p^* se vypočítají následovně:

$$a^* = \sqrt{\frac{2}{\kappa+1}} \kappa r T_0 = 313,3 \text{ m/s} \quad (51)$$

$$\rho^* = \rho \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}} = 1,884 \text{ kg/m}^3 \quad (52)$$

$$m^* = a^* \rho^* \cdot Šířka(x = 0) \cdot výška(x = 0) = 0,0826 \text{ kg/s} \quad (53)$$

$$T^* = T_0 \left(\frac{2}{\kappa+1} \right) = 244,3 \text{ K} \quad (54)$$

$$p^* = p_0 \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 132 \text{ kPa} \quad (55)$$

Rychlost ve stagnačním stavu je potom $v_0 = \frac{m^*}{A_0 \rho_0} = 0,4 \text{ m/s}$. Následně lze určit veličiny pro $x = 0$, které se rovnají kritickým hodnotám.

$$v(x = 0) = a^* \quad (56)$$

$$A(x = 0) = Výška(x = 0) \cdot Šířka(x = 0) \cdot 10^{-6} \quad (57)$$

$$\rho(x = 0) = \rho^* \quad (58)$$

$$p(x = 0) = p^* \quad (59)$$

$$m = v(x = 0) \cdot \rho(x = 0) \cdot A(x = 0) \quad (60)$$

Pro $x > 0$ potom platí:

$$p(x > 0) = p(x_{i+1}) - \frac{p(x=0) - p_0}{30} \quad (61)$$

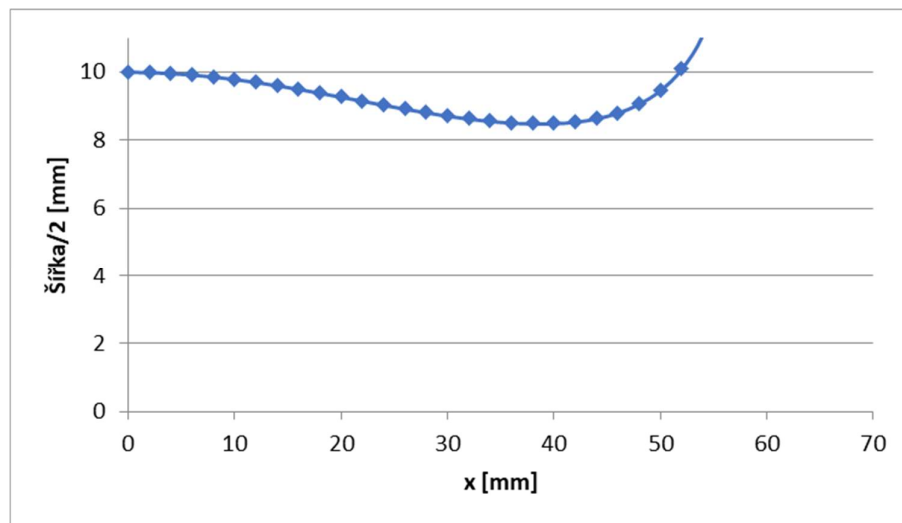
$$\rho(x > 0) = \rho_0 \left(\frac{p(x>0)}{p_0} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \quad (62)$$

$$v(x > 0) = \sqrt{2T_0 r^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \left(1 - \left(\frac{p(x>0)}{p_0} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \right)} \quad (63)$$

$$v(x = \max) = 10 \text{ m/s} \quad (64)$$

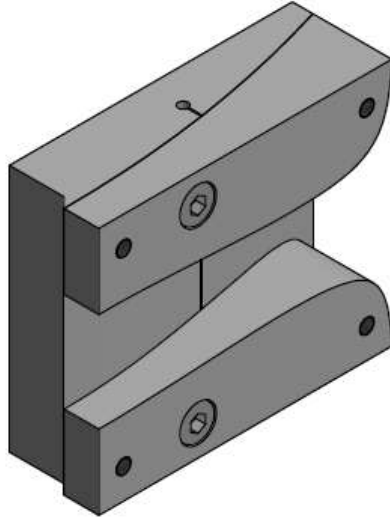
$$A(x > 0) = \frac{m}{v(x>0)\rho(x>0)} \quad (65)$$

Obr.63 zobrazuje závislost poloviny šířky na souřadnici x.



Obr.63 Průběh šířky v závislosti na vzdálenosti x

Na obr.64 je zobrazen výsledný model nové dýzy. Dýza se skládá z tří dílů, které jsou spojeny šrouby a zajištěny kolíky. V dýze je vytvořen žlábek pro dávkování vody.



Obr.64 Model nové dýzy

Model finální verze dýzy v navrženém tunelu je zobrazen na Obr.65.



Obr.65 Model Tunelu s novou dýzou

Na obr.66 je zobrazena výsledná dýza s tunelem zapojená do měřicí trati.



Obr.66 Tunel s novou dýzou

8 Závěr

Diplomová práce je zaměřena na návrh inovace trati pro měření hrubé vodní disperze.

Výstup práce je rozdělen do několika podstatných bodů:

- Teoretická část práce se zabývá problematikou tvorby hrubé vodní disperze a s tím spojenou erozí lopatek nízkotlakých stupňů parních turbín. Součástí rešerše je také popis nedávno provedených experimentů, které zkoumaly erozi lopatek parních turbín způsobenou hrubou vodní disperzí. Pozornost je také věnována tvorbě vodního filmu.
- Provedení experimentu na trati pro měření hrubé vodní disperze pomocí dvou optických metod se Spraytecem a s kamerou XIMEA. Následné zhodnocení výhod a nevýhod původní dýzy.
- Použití poznatků z měření pro návrh inovované trati. Návrh obsahuje nový tunel, novou dýzu a vylepšení dávkování vody. Součástí návrhu je výpočet dýzy, 3D model a výkresová dokumentace.
- Měření na inovované trati pomocí obou metod a zhodnocení přínosu nového návrhu.
- Finální návrh, který kombinuje výhody obou předchozích řešení.

Při měření na staré dýze bylo hlavní pozorovanou nevýhodou zamlžování sklíček. Při měření se Spraytecem zamlžení sklíček způsobuje odlišené rozptýlení paprsku a dochází k nepřesnému vyhodnocení kapek. Pokud zamlžení navíc dosáhne určité úrovně, Spraytec v tu dobu nevyhodnotí žádná data. Stará dýza umožňovala umístění Spraytecu na přední sklíčko, které bylo blíže odtokové hrany, a na zadní sklíčko. V průběhu experimentu docházelo vlivem stáčení proudu vzduchu, který unášel vlhkost vnesenou dávkováním vody, k mírnému zamlžování předního sklíčka a k výraznému zamlžení zadního sklíčka. Měření se Spraytecem na zadním sklíčku tedy bylo z tohoto důvodu nepřesné. Přestože na předním sklíčku nedocházelo k velkému zamlžení, je toto umístění také nevhodné. Za odtokovou hranou dochází k odtržení hrubé kapky, která je po určitý úsek nestabilní a dochází v ní ke kmitům. Spraytec proto mohl stále nestabilní kapce přiřadit nesprávnou velikost. Další nevýhodou bylo, že dýza simulovala spíše mezilopátkový kanál oběžného kola místo rozváděcího kola, na jehož lopatkách se hrubá vodní disperze zejména tvoří. Umístění profilu do kritického průřezu způsobovalo, že

docházelo k tvorbě rázových vln. Zároveň nebyl znám kritický průřez, a proto nebyla známa přesná rychlost proudění vzduchu na odtokové hraně. Pro lepší vyhodnocení experimentu bylo posouzeno, že by bylo vhodné znát časový průběh dávkovaného množství vody do dýzy.

Následně byl proveden návrh s cílem eliminovat tyto nedostatky. Použití plexiskla místo průhledítek umožňuje umístění Spraytecu po celé délce tunelu. Na navrženém tunelu byla také provedena diplomová práce studentů ze Skotska s cílem usměrnění proudu vzduchu vložením několika žeber do tunelu. To umožňuje měření se Spraytecem v dostatečné vzdálenosti od odtokové hrany, aby vzniklé kapky již byly v ustáleném stavu a zároveň nedocházelo k významnému zamlžení skla. Profil s odtokovou hranou byl nahrazen blokem dýzy, která byla opatřena odtokovou hranou a drážkou pro stékání dávkované vody. Odtoková hrana je součástí vypočítaného kritického průřezu, a proto nedochází k tvorbě rázových vln jako u staré dýzy. Zároveň pomocí známého průřezu u odtokové hrany lze dopočítat rychlost proudění. Součástí návrhu je také vylepšení dávkování vody. Byla navržena tlaková nádoba, která má funkci ustalování proudu vody, která je z nádoby čerpána přiváděním vzduchu z kompresoru. Následně proud vody prochází přes průtokoměr, kde se zaznamenává hodnota průtoku. Poměrně nízký průtok dávkované vody 1 ml/min způsobil, že použitelné průtokoměry byly nedostupné z důvodu vysoké ceny. Proto při měření ještě není využito zapojení s průtokoměrem a nádoba funguje jako zásobník vody pro čerpadlo. Při měření s kamerou vyšla najevo nevýhoda nově navržené dýzy. Z důvodu rovnoběžné orientace odtokové hrany s objektivem kamery bylo obtížné zaostřit vznikající kapky a zároveň nebylo možné nasnímat celou odtokovou hranu. Proto byla provedena ještě jedna iterace návrhu, která zkombinovala výhody obou dýz. Takto navržená dýza poslouží k měření probíhajícím i budoucím projektům na této experimentální trati.

V rámci měření se Spraytecem byla také vyhodnocena Weberova čísla pro umístění u obou sklíček staré dýzy a také pro dýzu novou. Graf závislosti objemového podílu na velikosti hrubých kapek u všech měření vykazoval dvojí režim hrubých kapek. Proto byly vznikající kapky rozděleny do skupin na malé a velké. Průměrná Weberova čísla při měření na předním skle vyšla $We_{malé} = 12,54$ a $We_{velké} = 422,28$. Průměrné hodnoty Weberova čísla při měření na zadním skle vyšly $We_{malé} = 7,95$ a $We_{velké} = 284,18$.

Průměrné Weberovo číslo malých kapek vyšlo $We_{malé} = 11,09$ a průměrné Weberovo číslo velkých kapek vyšlo $We_{velké} = 353,88$.

9 Literatura

- [1] KORNIA, Libor. *Parní turbíny provozní zkušenosti* [online]. Brno, 2019 Učební text. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.[vid. 2022-05-21]. Dostupné z: https://eu.fme.vutbr.cz/userfiles/Kudela/files/2019_Parn%C3%AD%20turb%C3%ADny_Skripta_Kornia.pdf.
- [2] Steam turbine generator 3D model. In: TURBOSQUID [online]. [vid. 2022-05-21]. Dostupné z: <https://www.turbosquid.com/3d-models/steam-turbine-3d-model-1149386>.
- [3] JANEČEK, Martin. *Regenerace v tepelném cyklu parních turbín* [online]. Plzeň, 2017 [vid. 2022-05-21]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/28726/1/Bakalarska%20prace-%20Martin%20Janecek.pdf>. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing Pavel ŽITEK
- [4] HOZNEDL, Michal, Michal KOLOVRATNÍK, Ladislav TAJČ, Andreas WEIß, Lukáš MRÓZEK. Influence of wet steam on the five-stage steam turbine efficiency. *Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air*. [online]. August 2018, 8 [vid. 2022-05-21]. ISBN: 978-0-7918-5117-3. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1115/GT2018-75033>.
- [5] BARTOŠ, Ondřej, Lucie MĚŠŤANOVÁ. An experimental study of the coarse droplets formations. *TURBOMACHINES* [online]. December 2018, 20, pp. 10-15. [vid. 2022-05-21]. ISBN 978-80-01-06521-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.14311/APP.2018.20.0010>.
- [6] BARTOŠ, Ondřej, Xiaoshu CAI, Michal KOLOVRATNÍK. A detection of the coarse water droplets in steam turbines. *EPJ Web of Conferences* [online]. March 2014, 67, pp.1-5. [vid. 2022-05-21]. ISBN: 978-80-260-5375-0. Dostupné z: <https://doi.org/10.1051/epjconf/20146702005>.
- [7] AHMAD, M., M. CASEY, N. STURKEN. Experimental assessment of droplet impact erosion resistance of steam turbine blade materials. *Wear* [online]. September 2009, 267(9-10), pp. 1605-1618. [vid. 2022-05-21]. ISSN 0043-1648. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.06.012>

- [8] KIROLS, H. S., D. KEVORKOV, A. UIHLEIN, M. MEDRAJ. Water droplet erosion of stainless steel steam turbine blades. *Materials Research Express* [online]. August 2017, 4(8). [vid. 2022-05-21]. ISSN: 2053-1591. Dostupné z: doi: [10.1088/2053-1591/aa7c70](https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa7c70).
- [9] LEE, B. E., K. J. RIU, S. H. SHIN, S. B. KWON. Development of a water droplet erosion model for large steam turbine blades. *Journal of Mechanical Science and Technology* [online]. January 2003, 17(1), pp.114-121). [vid. 2022-05-21]. ISSN: 1976-3824. Dostupné z: doi: [10.1007/BF02984292](https://doi.org/10.1007/BF02984292).
- [10] KIROLS, H. *Water Droplet Erosion: Influencing Parameters, Representation and Comparisons* [online]. Quebec 2015. Masters thesis. Concordia University, Mechanical Engineering. [vid. 2022-05-21]. Dostupné z: https://spectrum.library.concordia.ca/id/eprint/980617/1/KIROLS_MASc_F2015.pdf.
- [11] ASWINI, Palo. How to Calculate Thermal Efficiency of Rankine Cycle. In: *medium.com* [online]. 23.11 2018 [vid. 2022-05-21]. Dostupné z: <https://medium.com/@ashwinpalo/how-to-calculate-thermal-efficiency-of-rankine-cycle-37a7dbcadc12>.
- [12] LI, Na, Qulan ZHOU, Xi CHEN, Tongmo XU. Liquid drop impact on solid surface with application to water drop erosion on turbine blades, Part I: Nonlinear wave model and solution of one-dimensional impact. *International Journal of Mechanical Sciences*. [online]. October 2008, 50(10), pp.1526-1542. [vid. 2022-05-21]. ISSN: 0020-7403. Dostupné z: doi: [10.1016/j.ijmecsci.2008.08.001](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2008.08.001).
- [13] DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE [Katalog výrobků]. In: *dew-stahl.com* [online]. [vid. 2022-05-21]. Dostupné z: https://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Werkstoffdatenblaetter/RSH/1.4923_en.pdf.
- [14] BOYER, Rodney, Gerhard WELSCH, E W COLLINGS. *Materials properties handbook : titanium alloys*. 3rd Edition [online]. Materials Park, OH : ASM International, 2007. [vid. 2022-05-21]. ISBN: 978-0-97170-481-8. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt007TGFO1/materials-properties/front-matte>.
- [15] ZHANG, Zheyuan, Di ZHANG, Yong Hui XIE. Experimental study on water droplet erosion resistance of coatings (Ni60 and WC-17Co) sprayed by APS and HVOF. *Wear*

[online]. July 2019, 432-433, pp.185-191. [vid. 2022-05-21]. ISSN: 0043-1648. Dostupné z: doi: [10.1016/j.wear.2019.202950](https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.202950).

[16] ZHANG, Zheyuan, Tianyuan LIU, Di ZHANG, Yong Hui XIE. Water Droplet Erosion Life Prediction Method for Steam Turbine Blade Materials Based on Image Recognition and Machine Learning. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* [online]. January 2021, 143(3), [vid. 2022-05-21]. ISSN: 1528-8919. Dostupné z: doi: [10.1115/1.4049768](https://doi.org/10.1115/1.4049768).

[17] GUJBA, A.K., L. HACKEL, D. KEVORKOV, M. MEDRAJ. Water droplet erosion behaviour of Ti-6Al-4V and mechanisms of material damage at the early and advanced stages. *Wear* [online]. July 2016, 358, pp.109-122. [vid. 2022-05-21]. ISSN: 0043-1648. Dostupné z: doi: [10.1016/j.wear.2016.04.008](https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.04.008).

[18] KIROLS, H.S., D.G. KEVORKOV, A. UIHLEIN, M. MEDRAJ. Water droplet erosion of stainless steel steam turbine blades. *Materials Research Express* [online]. August 2017, 4(8). [vid. 2022-05-21]. ISSN: 2053-1591. Dostupné z: doi: [10.1088/2053-1591/aa7c70](https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa7c70).

[19] VALHA, Jan. Proudění mokré páry a její erozivní účinky v průtočné části parní turbíny. In: *Proudění mokré páry a její erozivní účinky v průtočné části parní turbíny*. Sborník referátů. Praha: Státní výzkumný ústav pro stavbu strojů, 1978, pp.15-102.

[20] BARTOŠ, Ondřej, Jakub VLASÁK. The influence of the surface properties on the droplets formation. *AIP Conference Proceedings* [online]. March 2021, 2323(1) [vid. 2022-05-21]. ISSN: 1551-7616. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/5.0041515>.

[21] BARTOŠ, Ondřej, Adam HUNĚK. *An Experimental Analysis of Droplet Charging in a Wind Tunnel*.

[22] MCGOVERN, Joseph, Andrzej MAMCZURA, Alexander MCMURRAY, Dillon BRADLEY, Megan WHITEHOUSE. *Investigating the effect of riblets on transonic fluid flow through a channel using numerical and empirical methods*. Praha, 2022. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní.

[23] BMT SUPERLOK [Katalog výrobků]. In: *SUPERLOK tube fitting* [online]. [vid. 2022-05-21]. Dostupné z:

<https://www.ventile.cz/index.php?route=product/product/download&file=bmt-superlok-tube-fitting-double-ferrule.pdf.1819f9b62d56f367f75d0dfbc9317e92>.

[24] LANASA, Paul J. UPP E. Loy. *Fluid Flow Measurement - A Practical Guide to Accurate Flow Measurement*. 3rd Edition [online]. Oxford: Elsevier, 2014. [vid. 2022-05-21]. ISBN: 978-0-12-409524-3. Dostupné z: <https://app.knovel.com/s.v?U5GdxkoX>.

[25] JAISWAL, Shiv, Sanjay YADAV, Ashis Kumar BANDYOPADHYAY, Ravinder AGARWAL. Global Water Flow Measurement and Calibration Facilities: Review of Methods and Instrumentations. *Mapan - Journal of Metrology Society of India* [online]. June 2012, 27(2), pp. 63-76. [vid. 2022-05-21]. ISSN: 0974-9853. Dostupné z: doi: <10.1007/s12647-012-0017-x>.

[26] IDC TECHNOLOGIES. Flow. In: *idc-online.com* [online]. [vid. 2022-05-21]. Dostupné z: https://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/instrumentation/Industrial_Instrumentation%20-%20Flow.pdf.

[27] BRONKHORST. Coriolis mass flow measuring principle. In: *bronzhorst.com* [online]. Bethlehem: BRONKHORST USA LLC [vid. 2022-05-21]. Dostupné z: <https://www.bronkhorst.com/en-us/service-support/knowledge-base/coriolis-mass-flow-measuring-principle/>.

10 Seznam tabulek

Tab.1 Materiály lopatek [13][14]

Tab.2 Hodnoty průměrné rychlosti a hustoty pro jednotlivá měření

Tab.3 Naměřené hodnoty pomocí Spraytecu při prvním měření

Tab.4 Rozdělení malých kapek

Tab.5 Rozdělení velkých kapek

Tab.6 Stanovené hodnoty pro jednotlivá měření

Tab.7 Weberova čísla pro jednotlivá měření

Tab.8 Průměrné hodnoty ustálené rychlosti a hustoty vzduchu v blízkosti kritického průřezu

Tab.9 Weberova čísla pro jednotlivá měření

Tab.10 Základní rozměry lopatky pro novou dýzu

Tab.11 Uvažované podmínky výpočtu

Tab.12 Zvolené průtokoměry a jejich parametry

Tab.13 Průměrné hodnoty ustálené rychlosti a hustoty vzduchu v blízkosti kritického průřezu

Tab.14 Stanovené hodnoty pro jednotlivá měření

Tab.15 Weberova čísla pro jednotlivá měření

Tab.16 Základní rozměry nové lopatky

Tab.17 Uvažované podmínky výpočtu

11 Seznam Obrázků

Obr.1 Parní turbína [2]

Obr.2 T-s diagram Rankin-Clausiova cyklu [3]

Obr.3 Vznik hrubých kapek na lopatce turbíny [5]

Obr.4 Průběh eroze [10]

Obr.5 Dopad kapky na povrch zkorodované lopatky [10]

Obr.6 Dodatečné přehřátí páry [11]

Obr.7 Experimentální trať prvního typu [15]

Obr.8 Rychlostní trojúhelník u experimentální trati prvního typu [16]

Obr.9 Průběh eroze pro jednotlivé úhly a nátěr HVOF WC-17Co [15]

Obr.10 Úbytek materiálu jednotlivých nátěrů [15]

Obr.11 Měřicí trať [17]

Obr.12 Závislost úbytku materiálu na počtu srážek [17]

Obr.13 Závislost úbytku materiálu na době vystavení [16]

Obr.14 Měřicí dýza s profilem [19]

Obr.15 Sonda na zachycování kapek [19]

Obr.16 Počet kapek daných rozměrů [19]

Obr.17 Závislost Weberova čísla na Machově čísle proudícího vzduchu [19]

Obr.18 Schéma experimentální tratě

Obr.19 Stará dýza

Obr.20 Schéma měření

Obr.21 Kompresor

Obr.22 Štítek kompresoru

- Obr.23 Čerpadlo
- Obr.24 Měřiče tlaku
- Obr.25 Termočlánek
- Obr.26 Mikroampérmetr
- Obr.27 Spraytec
- Obr.28 Průběh teploty a tlaků při prvním měření
- Obr.29 Průběh rychlosti v dýze v blízkosti kritického průřezu při prvním měření
- Obr.30 Průběh hustot při prvním měření
- Obr.31 Závislost objemového podílu a procentuálního podílu počtu kapek na průměru kapek
- Obr.32 Průběh D_{32} velkých a malých kapek při prvním měření
- Obr.33 Průběh objemového podílu velkých a malých kapek při prvním měření
- Obr.34 Závislost objemového podílu a procentuálního podílu počtu kapek na průměru kapek
- Obr.35 Průběh D_{32} velkých a malých kapek při prvním měření
- Obr.36 Průběh objemového podílu velkých a malých kapek při prvním měření
- Obr.37 Skript aktivní kontury
- Obr.38 Aktivní kontura 1
- Obr.39 Aktivní kontura 2
- Obr.40 Aktivní kontura 3
- Obr.41 Základní rozměry polotovaru pro novou dýzu
- Obr.42 Průběh šířky v závislosti na vzdálenosti x
- Obr.43 Model navržené dýzy
- Obr.44 Model tunelu s novou dýzou
- Obr.45 CFD simulace rychlosti v dýze [22]

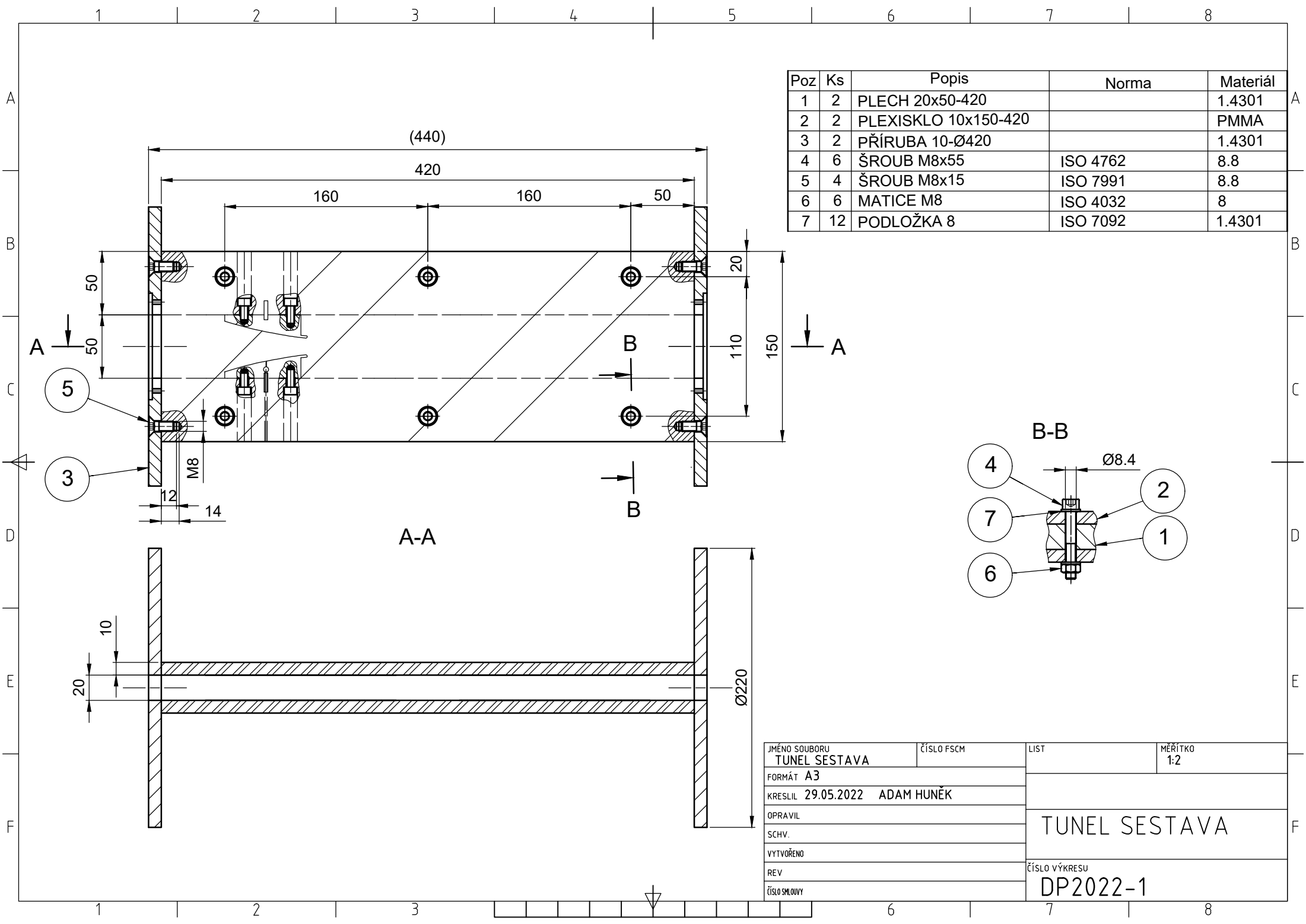
- Obr.46 CFD simulace rychlosti v dýze se žebry [22]
- Obr.47 Zapojení nové dýzy do měřicí tratě
- Obr.48 Schéma měřicí trati
- Obr.49 Model navržené tlakové nádoby
- Obr.50 Spojka SMS-6M-4R [23]
- Obr.51 Spojka SME-6M-4R [23]
- Obr.52 Spojka SU-6M [23]
- Obr.53 Varianty dávkování vody do dýzy
- Obr.54 Nádoba na dávkování vody
- Obr.55 Průběh tlaků a teploty při měření na nové dýze
- Obr.56 Průběh rychlosti v blízkosti kritického průřezu při měření na nové dýze
- Obr.57 Průběh hustot při měření na nové dýze
- Obr.58 Závislost objemového podílu a procentuálního podílu počtu kapek na průměru kapek
- Obr.59 Aktivní kontura pro novou dýzu 1
- Obr.60 Aktivní kontura pro novou dýzu 2
- Obr.61 Aktivní kontura pro novou dýzu 3
- Obr.62 Základní rozměry nové lopatky
- Obr.63 Průběh šířky v závislosti na vzdálenosti x
- Obr.64 Model nové dýzy
- Obr.65 Model Tunelu s novou dýzou
- Obr.66 Tunel s novou dýzou

12 Seznam příloh

Příloha č.1 – TUNEL SESTAVA DP2022-1

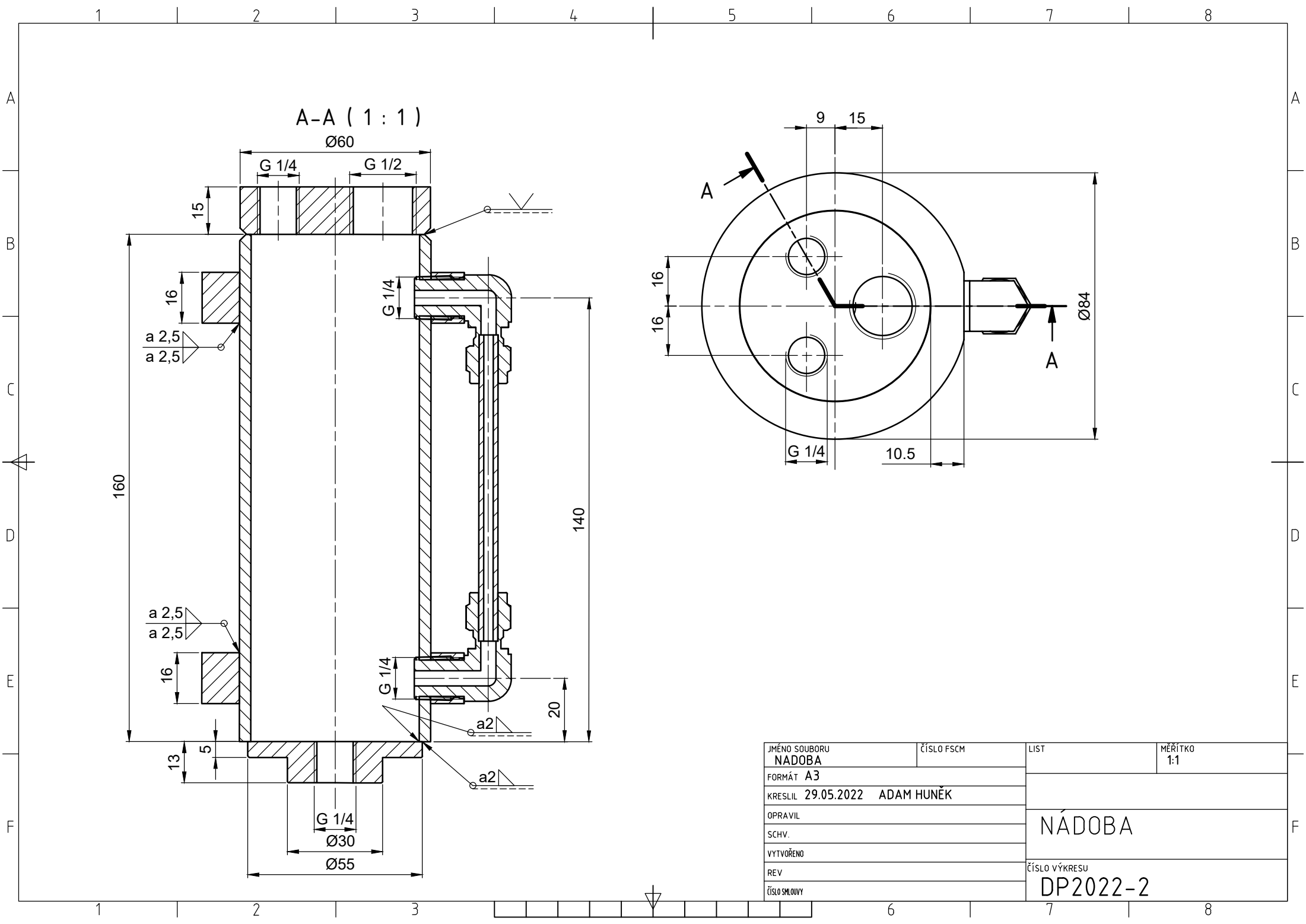
Příloha č.2 – NÁDOBA DP2022-2

Příloha č.3 – DÝZA SESTAVA DP2022-3



Poz	Ks	Popis	Norma	Materiál
1	2	PLECH 20x50-420		1.4301
2	2	PLEXISKLO 10x150-420		PMMA
3	2	PŘÍRUBA 10-Ø420		1.4301
4	6	ŠROUB M8x55	ISO 4762	8.8
5	4	ŠROUB M8x15	ISO 7991	8.8
6	6	MATICE M8	ISO 4032	8
7	12	PODLOŽKA 8	ISO 7092	1.4301

JMÉNO SOUBORU TUNEL SESTAVA	ČÍSLO FSCM	LIST	MĚŘÍTKO 1:2
FORMÁT A3			
KRESLIL 29.05.2022 ADAM HUNĚK			
OPRAVIL			
SCHV.			
VYTVORENO			
REV			
ČÍSLO SMLOUVY			
		TUNEL SESTAVA	
		ČÍSLO VÝKRESU DP2022-1	



A-A (1 : 1)

Ø60

G 1/4

G 1/2

15

16

a 2,5
a 2,5

160

a 2,5
a 2,5

16

13

5

G 1/4

Ø30

Ø55

G 1/4

a2

a2

140

20

9 15

A

16

16

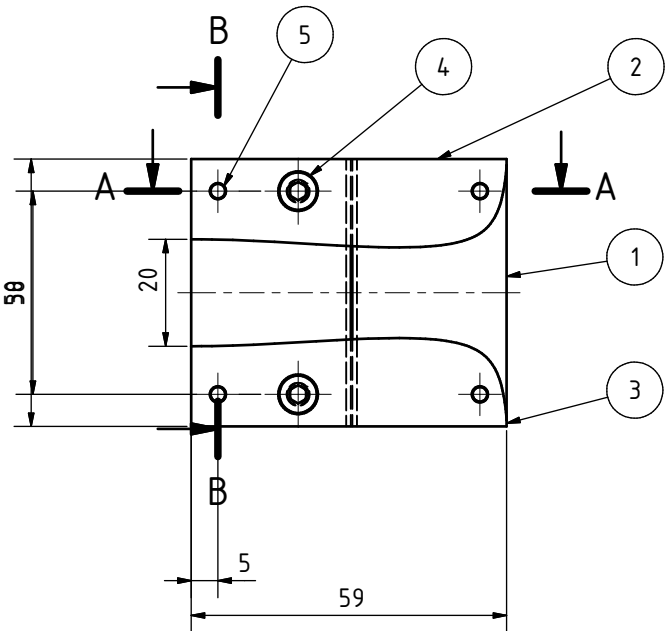
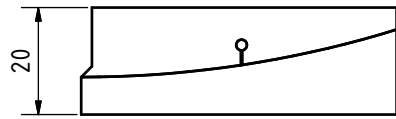
Ø84

A

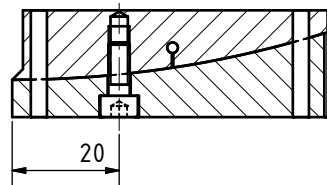
G 1/4

10.5

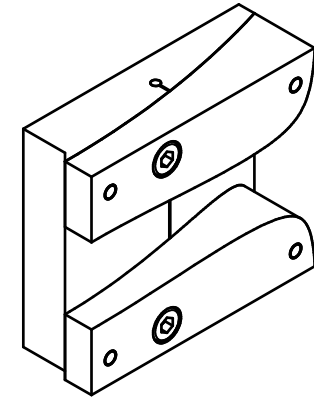
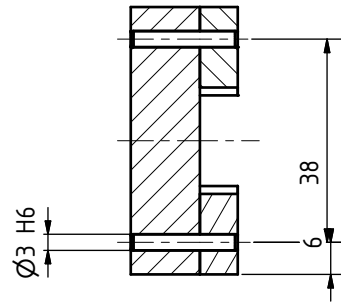
JMÉNO SOUBORU NADOBA	ČÍSLO FSCM	LIST	MÉRÍTKO 1:1
FORMÁT A3	KRESLIL 29.05.2022 ADAM HUNĚK		NADOBA
OPRAVIL	VYTVÖŘENO		
SCHV.	REV		ČÍSLO VÝKRESU DP2022-2
ČÍSLO SMLOVY			



A-A (1 : 1)



B-B (1 : 1)



KUSOVNÍK				
POLOŽKA	KS	POPIS	NORMA	MATERIÁL
1	1	DP2022-4		
2	1	DP2022-5		
3	1	DP2022-6		
4	2	Šrouby s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem M4x10	ČSN 02 1143	8.8
5	4	Podélné kolíky z kalené oceli 3x20	ISO 8734	OCEL

		Datum		Jméno	
		23.10.2021		ADAM HUNĚK	
		Nakreslen			
		Kontrola			
		Norma			
				DÝZA SESTAVA	
				DP2022-3	
				1	
				A3	
Stav		Změny		Datum	