

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav procesní a zpracovatelské techniky

HYDROCYKLON PRO MODELOVÁNÍ ODLUČIVOSTI KOKSU

Hydrocyclone for coke separability modeling

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3909T012 Procesní technika
Vedoucí práce: prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.

Praha 2018

Bc. Lucie Marcalíková

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(vloženo do výtisku práce)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce prof. Ing. Tomáše Jirouta, Ph.D.. a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne:

.....

Bc. Lucie Marcalíková

Poděkování:

Děkuji za odbornou pomoc vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Tomášovi Jiroutovi, Ph.D., rodičům, Dudu a všem blízkým za podporu při tvorbě diplomové práce a během studia na ČVUT FS v Praze.

Anotační list

Jméno autora:	Lucie
Příjmení autora:	Marcalíková
Název práce česky:	Hydrocyklon pro modelování odlučivosti koksu
Název práce anglicky:	Hydrocyclone for coke separability modeling
Rozsah práce:	počet stran: 61 počet obrázků: 39 počet tabulek: 3 počet příloh: 10
Akademický rok:	2017/2018
Jazyk práce:	čeština
Ústav:	Ústav procesní a zpracovatelské techniky
Studijní program:	Strojní inženýrství
Vedoucí práce:	prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
Oponent:	
Konzultant práce:	
Zadavatel:	Intecha, spol. s r. o.
Anotace česky:	V rámci práce byl navržen a odzkoušen matematický model pro modelování odlučivosti a tlakové ztráty v hydrocyklonu. Bylo navrženo a postaveno laboratorní zařízení, na kterém se otestovala shoda matematického a experimentálního modelu.
Anotace anglicky:	In this work, a mathematical model for modeling of separability and pressure loss in the hydrocyclone was designed and tested. A laboratory equipment was designed and built to test the mathematical and experimental model.
Klíčová slova:	hydrocyklon, odlučivost, matematický model, experimentální model, scale-up/down
Key words:	hydrocyclone, separability, mathematical model, experimental model, scale-up/down
Využití:	Uvedené podklady v práci je možné využít pro návrh průmyslových hydrocyklonů.

Obsah

1. Úvod	13
2. Matematický model popisující procesní parametry hydrocyklonu	14
2.1. Popis podstaty matematického modelu	14
2.2. Implementace teoretických rovnic do matematického modelu.....	18
2.2.1. Volba a výpočet koeficientů.....	20
2.2.2. Výpočet	21
2.2.3. Frakční odlučivost	23
3. Vliv hustoty na účinnost, definice částic a média	25
4. Návrh aparatury	27
4.1. Basic design	27
4.2. PID experimentu bez regulace	28
4.3. Výpočet rychlostí pro experiment.....	29
4.4. Konstrukce laboratorního hydrocyklonu	31
4.5. Popis jednotlivých dílů	32
5. Popis laboratorního experimentu	39
5.1. Prvky experimentálního okruhu.....	39
5.2. Měření a regulace, PID schéma.....	41
6. Experimentální měření	43
6.1. Kalibrace frekvenčního měřiče.....	43
6.2. Popis experimentu s reálnou suspenzí s částicemi koksu.....	43
6.3. Popis experimentu s modelovou suspenzí se skleněnou balotinou	45
7. Měření velikosti částic	46
7.1. Sítová analýza.....	46
7.1.1. Měřené vzorky	46
7.1.2. Měřicí zařízení.....	47
7.1.3. Postup měření.....	49
7.1.4. Vyhodnocení měření.....	50
7.2. Laserová analýza	54
7.3. Ověřovací experiment s balotinou	55
8. Analýza výsledků	56
8.1. Tlaková ztráta, ztrátový součinitel	56
8.2. Vyhodnocení odlučivosti s průmyslovou suspenzí.....	58
8.2.1. Zpracování experimentálních dat – celková odlučivost s průmyslovou suspenzí.....	58
8.2.2. Zpracování experimentálních dat – velikost částic	59

8.3. Frakční odlučivost cyklonu pro tři modelovací scale-up kritéria.....	60
8.4. Ověřovací pokus odlučivosti s balotinou.....	61
9. Závěr	63
10. Seznam symbolů.....	65
11. Seznam obrázků.....	68
12. Seznam tabulek	70
13. Literatura	71
14. Seznam příloh	72

1. Úvod

V technologii je potřeba oddělovat pevné částice z kapaliny. Pro danou konfiguraci kapaliny a velikosti částic se nabízí několik možností – použití gravitačního separátoru, odstředivky, vírového odlučovače nebo filtrace. Pro svoji jednoduchost byla zvolena separace za použití vírového odlučovače – hydrocyklonu. Metoda je založená na vytvoření rychle rotujícího pole kapaliny v nepohyblivém aparátu, kde separace probíhá na základě vzniklé odstředivé síly a rozdílné hustoty kapaliny a částic.

Použití cyklonů má mnoho výhod. Díky své jednoduché konstrukci jsou relativně levné, neobsahují žádné pohyblivé mechanické části, a proto jsou téměř bezporuchové. Jsou také nenáročné na údržbu, a proto se hodí do výrobních provozů. Pro zvýšení separačního výkonu mohou být cyklony zapojeny sériově nebo spojeny do jednoho konstrukčního celku, takzvaně multicyklonu.

Tato metoda separace se hodí pro rozsáhlou škálu aplikací, velkou výhodou je možnost kontinuálního režimu. Její použití je vhodné i pro vysoké teploty až do 1000°C a pro vysoké tlaky až do 500 bar. Hodnoty odlučivosti nejsou příliš závislé na vstupní koncentraci částic.

Nevýhodou metody je nutný rozdíl hustot separované látky a média (kapalina nebo plyn) a pro dobré hodnoty odlučivosti i vysoká vstupní rychlost, respektive vstupní průtok, což zvyšuje hodnotu tlakové ztráty. Při větších průměrech jsou potřeba i relativně vysoké čerpací průtoky pro dosažení požadovaných hodnot separace.

Tato práce se zabývá vytvořením matematického modelu pro chování hydrocyklonu a jeho experimentálním ověřením na laboratorním experimentálním zařízení.

Při návrhu se vycházelo z konkrétní průmyslové aplikace, která byla transformována do geometricky podobného experimentálního modelu, a na jejím základě byly provedeny a vyhodnoceny laboratorní experimenty.

Výstupy z této práce je možné použít pro optimalizaci hydrocyklonů a následně pro návrh metodiky scale-up návrhu průmyslových zařízení.

2. Matematický model popisující procesní parametry hydrocyklonu

Návrh cyklonu se může zakládat na několika hlavních postupech nebo na jejich kombinaci. Je možné využít CFD simulaci založenou na numerickém modelování, která ale nemusí dostatečně odpovídat reálnému chování z důvodu složitého rychlostního pole. Dále je možné vytvořit matematický model za použití známých rovnic nebo navrhnout zařízení na základě experimentů.

Pro tuto práci byla zvolena kombinace posledních dvou kritérií, tedy vytvoření matematického modelu a následně jeho experimentální ověření.

Návrh vychází z průmyslové aplikace, která byla převedena do matematického modelu, který byl ve zmenšeném měřítku experimentálně ověřen v laboratoři na experimentálním modelu.

2.1. Popis podstaty matematického modelu

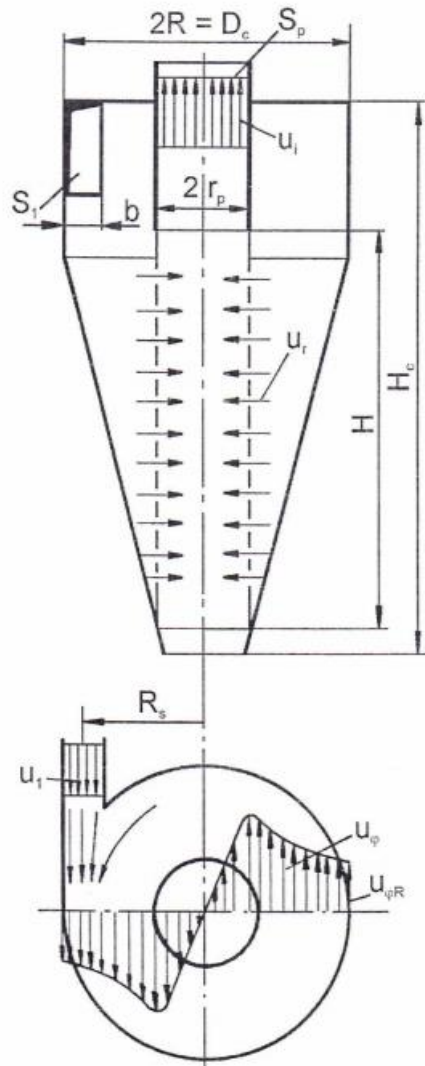
Teoretické podklady pro návrh a ověření vlastností hydrocyklonu lze nalézt ve vysokoškolském skriptu [1], kde je popis uveden společně pro aerocyklony i hydrocyklony základních konstrukcí.

Princip funkce hydrocyklonu je založen na sedimentaci částic v odstředivém poli a při řešení klíčových procesních parametrů cyklonu, tj. odlučivost a tlaková ztráta, se vychází ze silové rovnováhy. Pro popis silové rovnováhy je třeba znát rychlostní pole v cyklonu, které nejsme schopni změřit, ale jsme schopni ho popsat matematickým (či CFD) modelem.

Vlastní fyzikální princip cyklonů vychází z rovnováhy sil při radiálně-tangenciálním pohybu tekutiny v pracovním prostoru cyklonu, tj. oblast mezi jádrem cyklonu a stěnou cyklonu. Pro tangenciální složku se pak předpokládá, že platí rovnice

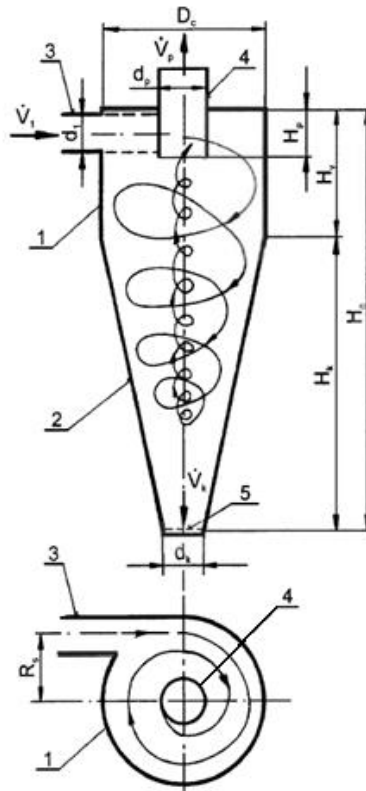
$$u_{\varphi} r^n = konst, \quad (1)$$

tedy průmět rychlostního profilu v pracovním prostoru hydrocyklonu sklopeného do roviny kolmé k jeho ose by měl zjednodušeně vypadat tak, jak je uvedeno na obr. 1.



Obrázek 1: Zjednodušené proudění v cyklonu [1]

Obecné schéma hydrocyklonu spolu s jeho hlavními rozměry, podle kterého se provádí výpočty, je uvedeno na obr.2. Kapalina s částicemi tangenciálně vstupuje trubkou (pozice 3) do válcového prostoru (pozice 1), kde začne vytvářet vírové proudění. Vzniká pole odstředivé síly, které odděluje ze suspenze částice o větší hustotě směrem se stěně zařízení. Odloučené částice se šroubovým pohybem v kuželové části (pozice 2) pohybují směrem dolů až k výstupu odlučované fáze (pozice 5). Tekutina v kuželové části obrací směr toku nahoru a spolu s neodloučenými částicemi odchází přepadovou trubkou (pozice 4) ven z hydrocyklonu.

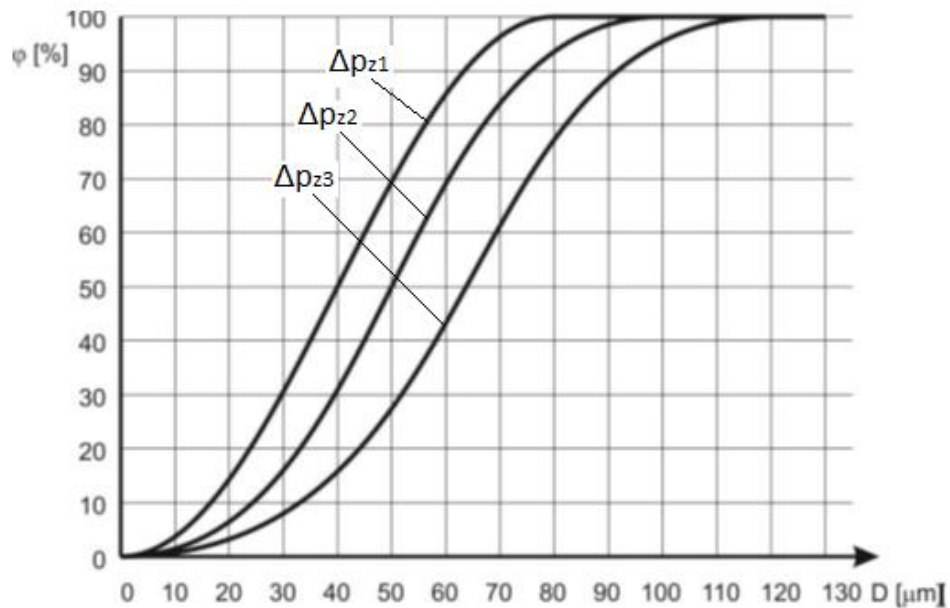


Obrázek 2: Schéma hydrocyklonu [1]

Při návrhu cyklonu je vzhledem k jeho funkci počítána prioritně frakční odlučivost definovaná jako podíl hmotnosti odloučených částic o frakční velikosti D_i vztažené na hmotnost (hmotnostní tok) těchto částic vstupujících do cyklonu. Matematicky je pak frakční odlučivost vyjádřena jako

$$\varphi_i = \frac{\dot{m}_{sik}}{\dot{m}_{sl}} \quad (2)$$

Typický průběh frakční odlučivosti vynesené v závislosti na odpovídajícím průměru částic je pak uveden na obr. 3.



Obrázek 3: Ilustrační obrázek frakční odlučivosti

Křivky znázorněné v grafu na obr. 1 pak lze popsat pomocí rovnice, která vychází ze silové rovnováhy, a jsou podrobně odvozeny v [1]:

$$\varphi_i(D_i) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{D_i}{D_{50} k_{\varphi t} k_{\varphi c}} \right)^{n_{\varphi}} \right] \quad (3)$$

D_{50} zde označuje tzv. kritický průměr, tj. průměr částic, které jsou cyklonem odloučeny s 50% pravděpodobností (pro křivku Δp_{z2} na obr. 3 se jedná o průměr 50 μ m). Tento kritický průměr je pak určován ze vztahu [1]:

$$D_{50} = \frac{3}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{S_1 \mu}{H_0 (\rho_s - \rho) u_1} \frac{\alpha D_c}{2 R_s} \left(\frac{d_p}{D_c} \right)^n} \quad (4)$$

Kromě geometrických parametrů cyklonu S_1 , H_0 , D_c , d_p , R_s (zakótováno na obr.2), rychlosti na vstupu do cyklonu (u_1) a parametrů tekutiny a odlučovaných částic (ρ_s , ρ , μ) je ve vzorci uveden korekční empirický koeficient α a exponent n . Hodnoty koeficientu a exponentu je možné určit buď na základě rovnic dostupných v odborné literatuře, z CFD simulace, nebo lze odvodit jejich velikost z experimentálně získaných hodnot.

2.2. Implementace teoretických rovnic do matematického modelu

Celkový výpočet podle skript [1] je k dispozici v příloze (1) včetně odpovídajícího značení veličin, náhled výpočtu je na obr.4. Geometrie, parametry kapaliny a částic a průtoky byly zadány jako hodnoty průmyslového hydrocyklonu, pro který jsou k dispozici naměřené hodnoty tlakové ztráty. Výpočet podle literatury je pro vstupní otvor obdélníkového tvaru, pro potřeby našeho matematického modelu byly rovnice upraveny pro kruhový průřez vstupního hrdla.

Hodnota průtoku na vstupu V_1 je daná, hodnota průtoku odloučených částic V_k byla navržena jako $V_k = 0,01-0,05 \cdot V_1$ a pro potřeby matematického modelu je $V_k = 0,025 \cdot V_1$. Hodnota průtoku v přepadové trubce je pak $V_p = V_1 - V_k$.

Výpočtová teplota je stanovena na 30°C a k ní se vztahují fyzikální vlastnosti kapaliny a částic.

Pro upřesnění se pod pojmem suspenze míní směs vody a koksových částic, médium je nosná kapalina – quenčová voda a částice jsou částice koksu o různých frakcích.

	A	B	C	D	E	F
1	2100	T	30 °C			
2		V_1	0,58333333 m ³ /s		2100 t/h	
3	cca hodnota jako V_1, menší o odloučené částice	V_p	0,56875 m ³ /s			m ³ /h
4	*snaha o co nejmenší hodnotu V1-Vp	V_k	0,01458333 m ³ /s			m ³ /h
5		kruhový vstup d_1	0,237 m		237 mm	
6		obdélníkový vstup a	- m		0 mm	
7	vložit hodnotu	b	- m		0 mm	
8	z výpočtu, neměnit	d_p	0,28 m		280 mm	
9	zadat hodnotu z grafu	d_k, D_k	0,215 m		215 mm	
10		D_c	0,726 m		726 mm	
11		R_s	0,245 m		245 mm	
12	teoretická délka víru	H_0	1,66856164 m			mm
13		H_k	0,994 m		994 mm	
14		H_c	2,425 m		2425 mm	
15		H_p	0,63 m		630 mm	
16		H_v	1,431 m		1431 mm	
17		α zvolená	0,84 -		upravit na dalším listu	
18	exponent	n	0,72113417 -		< -0,5; 0,8 >	0,7211342
19						
20	poloměr pro průběhy tlaků/rychlostí	r?	0,01 m		10 mm	
21	tlak	p_1	0 Pa			
22	hustota kapaliny	ρ_kap/plyn	995 kg/m ³			
23	hustota částic	ρ_particles	1250 kg/m ³			
24	dynamická viskozita	μ_kap/vzd	0,0007978 Pa.s		??	
25	střední drsnost vnitřního povrchu cyklonu	k_stř	0,00003 mm			mm
26	součinitel tření	f	0,4 -		< 0,1; 0,4 >, aerocyklon f=0,6	
27	hmotnostní podíl složky ve směsi (vstup)	w_1	0,001 -		podm: w_1 < 0,1	0,001
28	hmotnost zachycených zrn o fr.rozměru Di	m_sik	1 kg			
29	hmotnost zrn na výstupu o fr.rozměru Di	m_sil	1 kg			
30	hmotnost všech odloučených částic	m_sk	1 kg			
31	hmotnost vstupujících částic	m_sl	1 kg			
32	rozměr i částic	D_i	0,001 m			mm
33	parametr v závislosti na kvalitě cyklonu	k_φc	1,1 -		< 1; 1,3 >	skripta 1,25
34	ztrátový součinitel cyklonu pro u_ch	ζ_c	531,445674 -		od výrobce	
35	ztrátový součinitel cyklonu pro u_1	ζ_1	14,5 -		z grafu, Dc/dp=	2,5928571
36	hm. průtok kapaliny v přepadové trysce	m_lp	1 kg/s			
37	hm. průtok kapaliny na vstupu do hydrocykl.	m_l1	1 kg/s			
38	objemová konc. na výstupu přepadové trubky	c_v1	1 -			
39	objemová konc. na výstupu výtokové trysky	c_vk	1 -			
40	tlaková diference na cyklonu pro u_ch	Δp_c (u_ch)	525000 Pa			

Obrázek 4: Vstupní hodnoty pro výpočet

Výpočtový model je pro každý daný průtok (2100, 1050, 950, 700, 525 t/h) uveden na samostatném listu, celkové vyhodnocení odlučivosti a tlakové ztráty se nachází odděleně na zvláštních listech, stejně tak výpočet koeficientu α (obr.5).

výpočet	α	odlučivost	tlakové ztráty	2100	1050	950	700	525	+
----------------	----------	------------	----------------	------	------	-----	-----	-----	---

Obrázek 5: Uspořádání výpočtů

2.2.1. Volba a výpočet koeficientů

Koeficient n , upravující v rovnici (1) tvar rychlostního pole, závisí na geometrii cyklonu, fyzikálních vlastnostech vstupní suspenze a jeho hodnota není stejná ve všech místech cyklonu. Zavádí se proto empirický součinitel α , který závisí na geometrii cyklonu (viz. samostatný list „ α “ v příloze (1)). Dále se pro výpočet exponentu n musí stanovit hodnota střední drsnosti vnitřního povrchu cyklonu $k_{stř}$ a hodnota součinitele tření f , které slouží jako parametry matematického modelu.

Při znalosti koeficientu n jsme pak schopni určit hodnotu kritického průměru D_{50} (z rovnice 4) a následně i celou křivku frakční odlučivosti ϕ_i z rovnice (3). K tomu je ještě nutné doplnit rovnice pro výpočet koeficientů n_ϕ a $k_{\phi t}$, které jsou parametry exponenciálního modelu frakční odlučivosti.

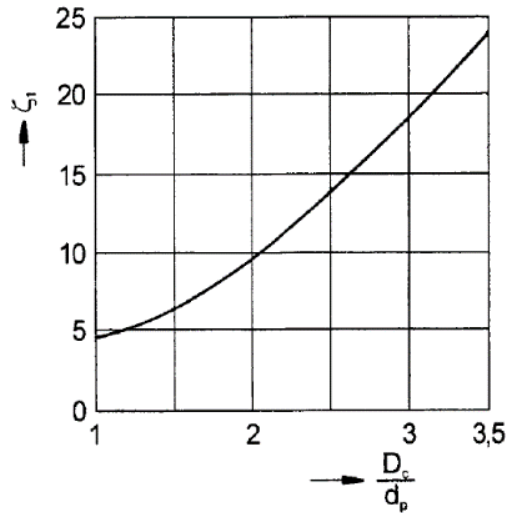
$$k_{\phi t} = 1,862 - 0,723n \quad (5)$$

$$n_{\phi t} = \frac{0,3665}{\ln k_{\phi t}} \quad (6)$$

Koeficient $k_{\phi c}$ je pak závislý na konkrétní geometrii cyklonu, pohybuje se v rozmezí 1 až 1,3.

Poslední skupinou ve stanovení ztrátových součinitelů cyklonu ζ_1 a ζ_c , které jsou potřeba pro výpočet tlakové ztráty cyklonu. Ztráta v cyklonech je rozdíl měrné energie na vstupu do cyklonu a v přepadové trubce. Ztrátový součinitel se určuje experimentálně a obvykle bývá udáván výrobcem a závisí na geometrii cyklonu.

Není-li součinitel ζ_1 zadán od výrobce, je možné ho určit podle obr. 6, kde je hodnota součinitele funkcí geometrie a je vtažena k rychlosti na vstupu do cyklonu.



Obrázek 6: Graf závislosti ztrátového součinitele cyklonu ζ_1 pro $Re > 105$

Hodnotu ζ_c je možno vypočítat z naměřených hodnot tlakové ztráty. Hodnota ζ_c je vztažena k charakteristické rychlosti u_{ch} ve válcové části cyklonu, je definovaná vztahem (7) a je funkcí geometrie.

$$\Delta p_z = \zeta_c \frac{u_{ch}^2}{2} \rho_{kap} \quad (7)$$

2.2.2. Výpočet

Veškeré potřebné rovnice pro výpočet jsou i s vysvětlením uvedeny ve skriptu [1], v matematickém modelu se používá stejné značení veličin viz obr.7. Následující výpočty slouží jako analýza jednotlivých vlivů na hydrocyklon a výpočty jsou pro geometrii a vstupní parametry dané průmyslovou aplikací.

	střední hodnota radiální složky rychlosti	u_rp	0,397435479	m/s
	výška	H_0	1,668561644	m
	střední rychlost ve vstupním kanále	u_1	13,22300678	m/s
	plocha vstupního obdélníkového kanálu	S_1	0,044115029	m ²
	střední hodnota axiální rychlosti na výstupu z přepadové trubky	u_ap	9,236670804	m ²
	tangenciální rychlost na okraji jádra	u_φr	23,98770626	m/s
	tangenciální rychlost v jádře cyklonu	u_φ	0,122386256	m/s
	tlak na okraji jádra	p_p	-1029622,373	Pa
	průběh tlaků v jádře cyklonu, f ^o	p	-800848,0932	Pa
	celková tlaková diference	Δp_i	841743,3076	Pa
	fiktivní rychlost ve válcové části cyklonu	u_c	1,409138469	m/s
	ztráta cyklonu pro u_c	e_z (u_c)	527,638191	J/kg
	tlaková diference na cyklonu pro u_c	Δp_c (u_c)	480457,9192	Pa
	ztráta cyklonu pro u_1	e_z (u_1)	1267,647335	J/kg
	tlaková diference na cyklonu pro u_1	Δp_c (u_1)	1216767,018	Pa
	souč. hydraulického tření tekutiny	λ_l	0,002900102	-
	ekvivalentní souč. tření disperg. částic o stěnu cyklonu	λ_s	4,65363E-05	-
	exponent	n	0,854752608	-
	relativní drsnost vnitřního povrchu cyklonu	k*	4,13223E-06	-
	Ljaščenkovo číslo	Ly_50	74,32971066	-
	Reynoldsovo číslo	Re_50	66,75426718	-
	rozměr částic s odlučivostí 50%	D_50	7,37941E-05	m
	Stokesovo kritérium	$D_{50} \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho) u_1}{\mu D_c}}$	0,178049872	-
	frakční odlučivost	φ_i	1	-
	celková odlučivost	φ	1	-
	parametr exponenciálního modelu frakční odlučivosti	k_φt	1,244013865	-
	parametr exponenciálního modelu frakční odlučivosti	n_φ	1,678550565	-
	celková odlučivost polydisperních směsí	φ	6,805711022	-
	účinnost hydrocyklonu	η_h	6,805711022	-
	objemová konc. pevné fáze v přepadajícím proudu	c_vp	1	-
	charakteristická rychlost	u_ch (D_c)	1,409138469	m/s
	odstředivé zrychlení	a_d	5,470168665	m/s ⁽⁻²⁾

Obrázek 7: Zobrazení výpočtových parametrů v matematickém modelu (excel)

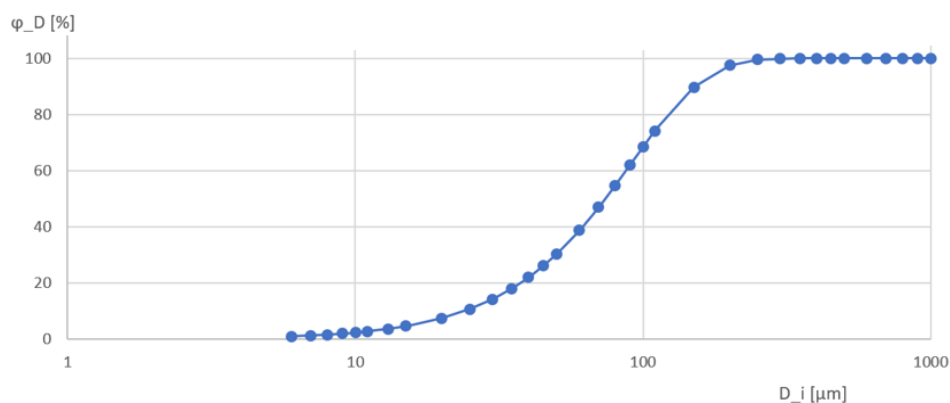
2.2.3. Frakční odlučivost

Výpočet frakční odlučivosti φ_D podle rovnice (3) a graf $\varphi_D = f(D_i)$, kde D_i je velikost částic, je zobrazen na obr.8, nebo lze nalézt v příloze (1).

U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL
Vypočtené hodnoty:																	
D_i [μm]	6	7	8	9	10	11	13	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70
φ_i [-]	0,0102141	0,01321	0,016502	0,020073	0,023909	0,027999	0,036892	0,046672	0,074541	0,106547	0,141868	0,179777	0,219617	0,260794	0,302767	0,387223	0,469738
φ_D [%]	1,0214116	1,321044	1,650198	2,007292	2,390938	2,799886	3,689226	4,667166	7,454077	10,65468	14,18683	17,97772	21,96174	26,07935	30,27673	38,72235	46,97381
w_i	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
φ	0,0102141	0,01321	0,016502	0,020073	0,023909	0,027999	0,036892	0,046672	0,074541	0,106547	0,141868	0,179777	0,219617	0,260794	0,302767	0,387223	0,469738

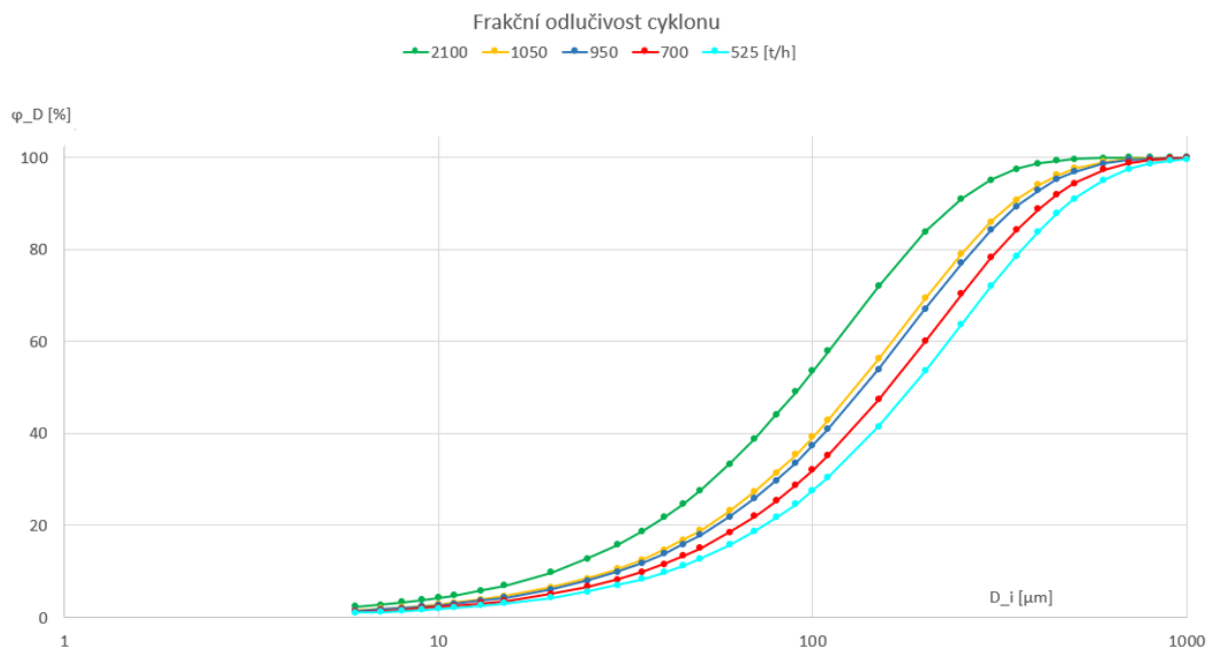
	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC
D_i [μm]	80	90	100	110	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800	900	1000
φ_i [-]	0,547863	0,619888	0,684759	0,741975	0,897719	0,975162	0,995366	0,999323	0,999922	0,999993	0,999999	1	1	1	1	1	1
φ_D [%]	54,78631	61,98884	68,47591	74,19751	89,77192	97,51616	99,53661	99,93235	99,99216	99,99927	99,99995	100	100	100	100	100	100
w_i	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
φ	0,547863	0,619888	0,684759	0,741975	0,897719	0,975162	0,995366	0,999323	0,999922	0,999993	0,999999	1	1	1	1	1	1

Frakční odlučivost cyklonu



Obrázek 8: Výpočet frakční odlučivosti a její znázornění v grafu

Na stejném listu se také nachází (obr. 9) porovnání frakčních odlučivostí cyklonu pro různé průtoky V_1 v tunách za hodinu. Z grafu je patrné, že pro stejné parametry zařízení se při vyšším průtoku odlučivost zvyšuje, zároveň se ale s vyšším průtokem zvyšuje hodnota tlakové ztráty.



Obrázek 9: Porovnání frakčních odlučivostí cyklonu pro různé průtoky

3. Vliv hustoty na účinnost, definice částic a média

Při oddělování kapalných nebo pevných částic v cyklonech se využívá principu odstředivé síly vyvolané rotačním pohybem tekutiny v nepohyblivém aparátu. Hnací síla pro separaci částic je rozdílná hustota média a částic „ $(\rho_s - \rho)$ “, jak je vidět například v rovnici (4) pro výpočet kritického průměru D_{50} .

Pro správný návrh zařízení je tedy potřeba znát hodnoty obou hustot.

Hydrocyklon v tomto případě pracuje s quenchovou vodou ($\rho = 995 \text{ kg/m}^3$) a částicemi koksu. Zjistit přesnou hustotu koksu je velmi obtížné, protože není možný odběr částic z technologie před vstupem do cyklonu a vzorky částic z jiných odběrných míst se svojí hustotou liší. Následující hodnoty hustot jsou pro $t = 20^\circ\text{C}$.

Byla provedena série nezávislých měření hustoty různých vzorků koksu a hodnoty se pohybovaly v rozmezí $1000 \text{ kg/m}^3 - 1900 \text{ kg/m}^3$ (viz. příloha (2), list „exp. měření hustoty koksu“). Jedno z měření probíhalo v laboratořích FS ČVUT za pomoci piktometru a zkoumala se hustota 2 vzorků koksu.

První vzorek byly částice nasáklé olejem z technologie, odběrné místo vzorku bylo ještě před vstupem do hydrocyklonu. Střední hustota prvního vzorku byla vyhodnocena jako 1085 kg/m^3 .

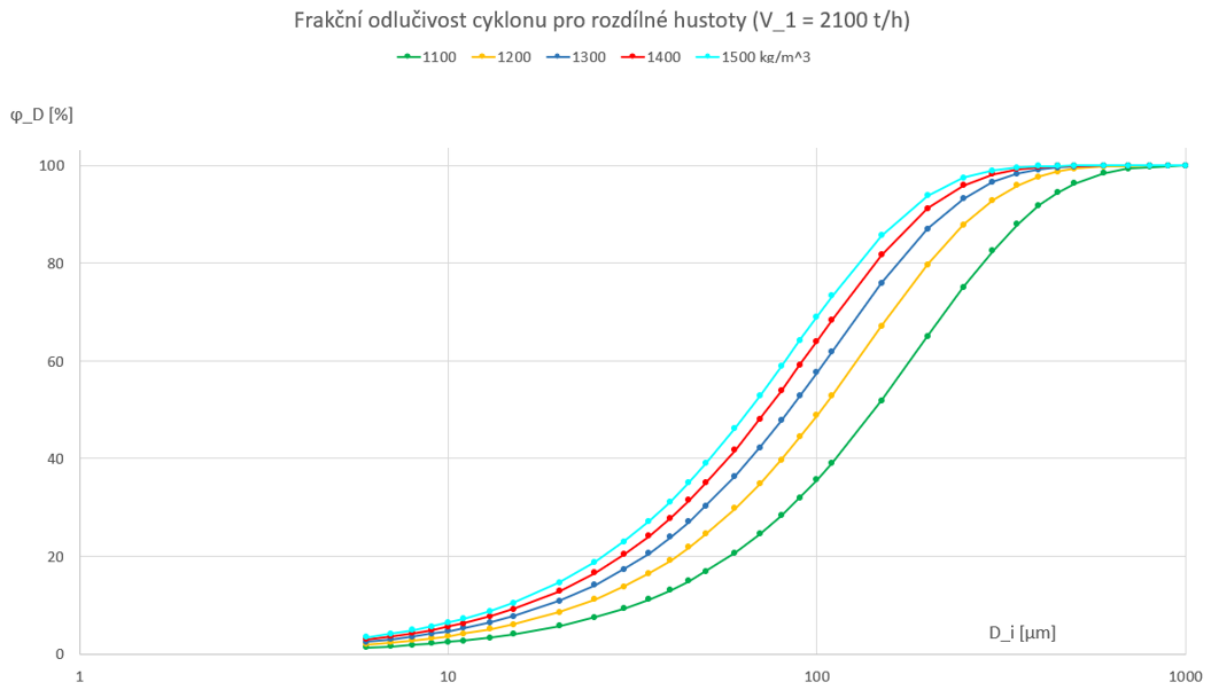
Druhý vzorek byly odloučené částice koksu odebrané na výstupu z hydrocyklonu, které byly „vyprané“ ve vodě, a tedy z velké části zbavené oleje. Střední hustota druhého vzorku byla vyhodnocena jako 1042 kg/m^3 .

Další měření bylo provedeno v laboratoři Výzkumného ústavu pro hnědé uhlí, kde se ovšem měřila zdánlivá hustota. Vzhledem k povaze částic je obtížné stanovit jejich pórovitost i povahu pórů (uzavřené/ otevřené póry). V případě, že částice nemá uzavřené póry, pak se zdánlivá hustota rovná měrné hmotnosti, tedy hustotě. Výsledky tohoto měření mohou být zkreslené, nicméně naměřená zdánlivá hustota se pohybuje v rozmezí $1585 - 1895 \text{ kg/m}^3$ a není možné takto vysoká čísla nevízt v úvahu.

Proto byla provedena citlivostní analýza vlivu hustoty na odlučivost pro nejvyšší průtok 2100 t/h (příloha (2)). Analýza je pro pět různých hodnot hustoty koksu, $1100 - 1500 \text{ kg/m}^3$, přičemž se předpokládá, že reálná hodnota se nachází v tomto intervalu.

Na obrázku 10 je vidět, že čím je větší hustota částic, respektive čím je větší rozdíl hustot média a částic, tím cyklon dosahuje lepších hodnot separace.

Pro potřeby matematického modelu a konzistenci výpočtů byla stanovena hodnota hustoty částic koksu jako 1250 kg/m^3 .



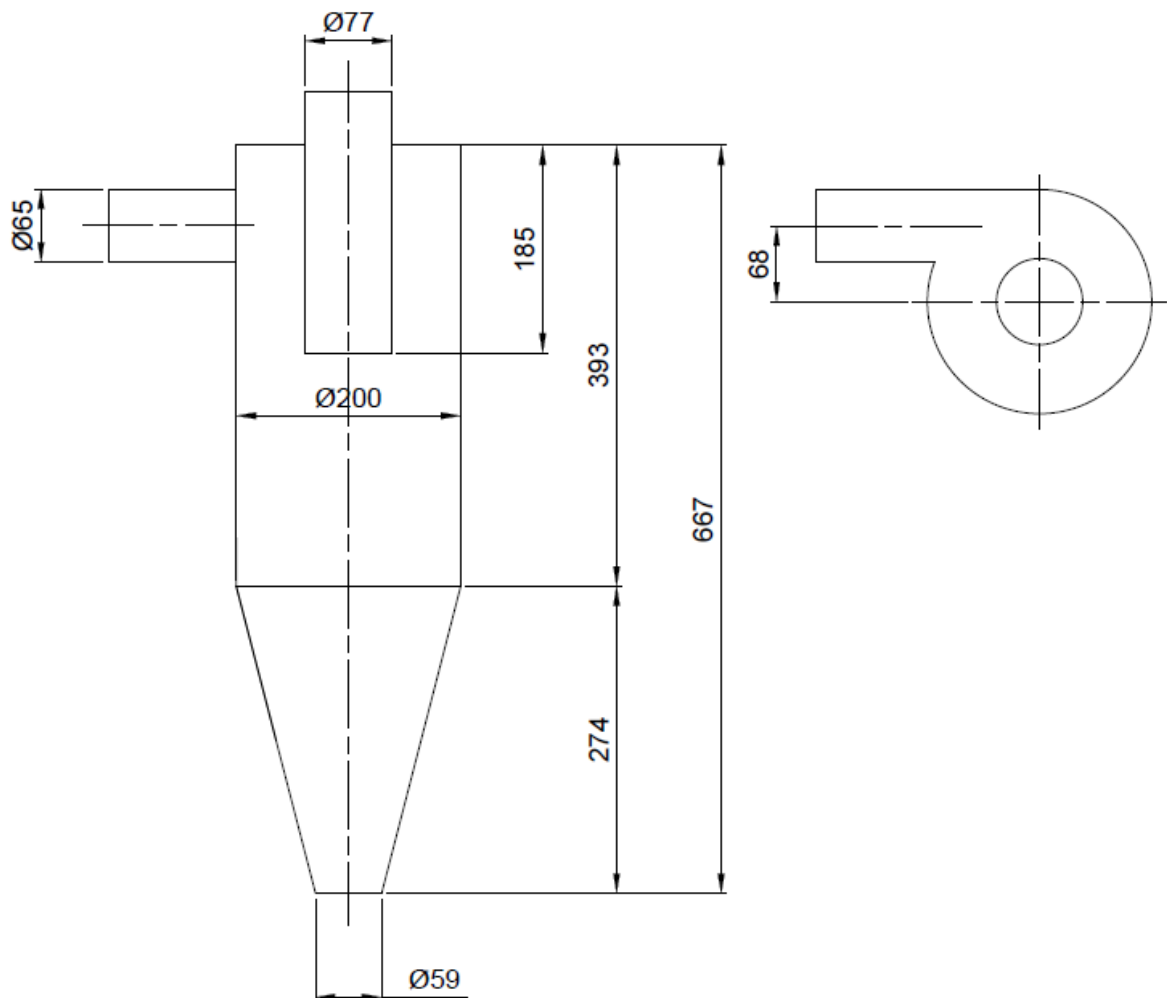
Obrázek 10: Frakční odlučivost cyklonu pro různé hustoty

4. Návrh aparatury

4.1. Basic design

Návrh hydrocyklonu vychází z průmyslového zařízení. Geometrie je proto zachována, jen se v měřítku zmenší na principu scale – down, viz. obrázek 11.

Scale – down zařízení je vztažen na vnitřní průměr D_c válcové části cyklonu. Z průmyslového rozměru $D_{c1} = 726$ mm se průměr zmenšil na $D_{c2} = 200$ mm, tedy v měřítku 1:3,63. Dostatečné zmenšení je nutné pro laboratorní účely, menší zařízení má menší nároky na konstrukci, čerpadla nebo například na velikost nádrží pro suspenzi. Zmenšení ale nesmí být příliš velké, aby byla zachována relevantnost fyzikálních principů vzhledem k velikosti částic, a tedy byly zachovány vlastnosti suspenze.

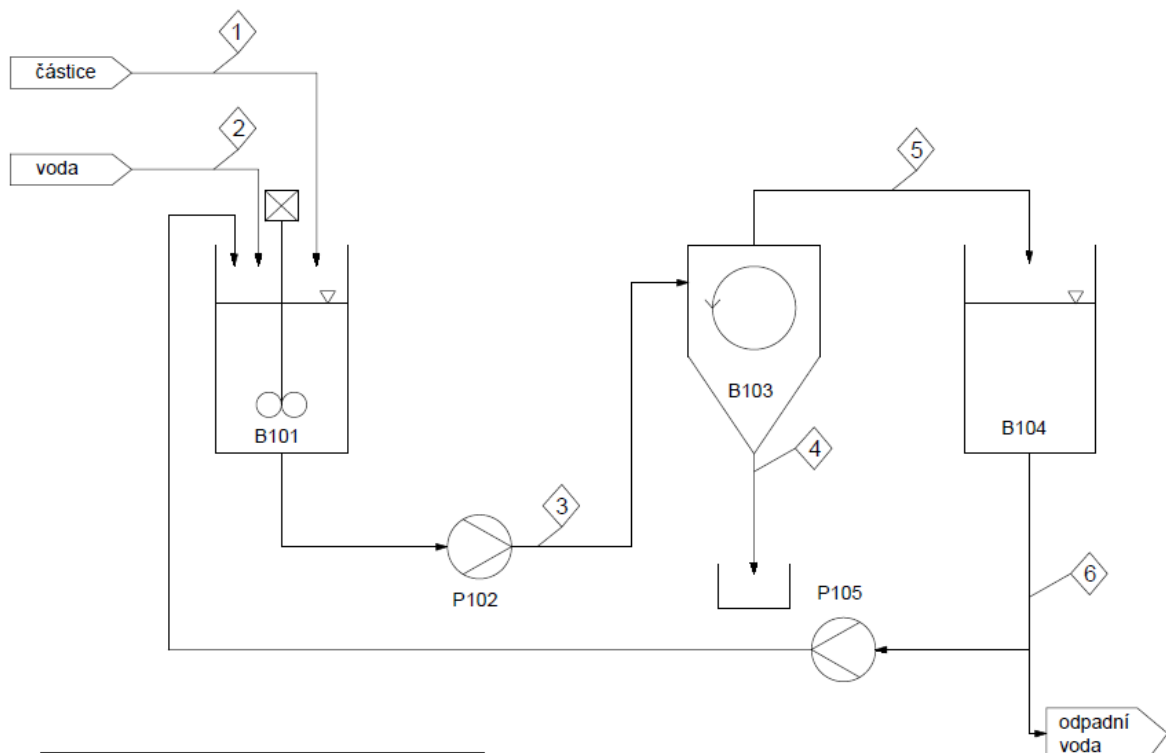


Obrázek 11: Basic design hydrocyklonu s hlavními rozměry

4.2. PID experimentu bez regulace

Před vlastní přípravou experimentu bylo potřeba sestavit PID celé laboratorní technologie (obr. 12).

Míchaná nádoba B101 se zaplní vodou a přimíchá se požadované množství částic pro vytvoření suspenze. Částice se za pomoci míchadla rozmíchají a pomocí procesního odstředivého čerpadla P102 se suspenze přečerpá přes laboratorní hydrocyklon B103 do IBC nádrže B104. Odloučené částice se pomocí ventilu na spodní části hydrocyklonu vysypou ven do sběrné nádoby. Voda z IBC nádrže se manipulačním vřetenovým čerpadlem P105 přečerpá zpět do míchané nádoby nebo odpadního potrubí.



Tabulka proudů	
Číslo proudu	Složení
1	částice (koks, balotina, jiné)
2	voda
3	suspenze (voda + částice)
4	odloučené částice
5	voda + neodloučené částice
6	voda + neodloučené částice

Tabulka aparátů	
Číslo aparátu	Popis
B101	Míchaná nádoba
P102	Odstředivé čerpadlo
B103	Laboratorní hydrocyklon
B104	IBC nádrž
P105	Přečerpávací vřetenové čerpadlo

Obrázek 12: PID experimentu bez regulace

4.3. Výpočet rychlostí pro experiment

Geometrie laboratorního cyklonu byla zmenšen v měřítku 1:3,63 oproti stávajícímu stavu. V rámci zmenšení geometrie se také musí upravit vstupní průtok $V_{1,1}$. Nabízí se tři modelovací kritéria, podle kterých jde průtok upravit, a to kritérium konstantní vstupní rychlost, konstantní odstředivé zrychlení ve válcové části cyklonu nebo konstantní Stokesovo číslo. Najít správné modelovací kritérium je podmínkou ověření experimentálních výsledků s výpočty.

Parametry modelovacích kritérií vychází z průmyslově používaného nejvyššího průtoku $V_{1,1} = 2100 \text{ m}^3/\text{h}$. Dolní index „1“ je pro hodnoty průmyslového cyklonu, index „2“ pro zmenšený laboratorní cyklon. Kompletní výpočet se nachází v příloze (3) a (4).

Hypotézy pro modelování scale – up – down odlučivosti:

1. Konstantní vstupní rychlost

$$u_{1,1} = u_{1,2} = 8 \text{ m/s} \quad (8)$$

$$V_{1,2} = 3600 u_{1,2} S_{1,2} = 3600 * 8 * 0,003348 = 96,4 \text{ m}^3/\text{h} \quad (9)$$

2. Konstantní odstředivé zrychlení ve válcové části cyklonu

$$u_{1,1} = 8 \text{ m/s} \quad (10)$$

$$\frac{u_{1,1}^2}{R_{c,1}} = \frac{u_{1,2}^2}{R_{c,2}} \quad (11)$$

$$u_{1,2} = \sqrt{u_{1,1}^2 \frac{R_{c,2}}{R_{c,1}}} = \sqrt{8^2 \frac{67,5}{245}} = 4,2 \text{ m/s} \quad (12)$$

$$V_{1,2} = 3600 u_{1,2} S_{1,2} = 3600 * 4,2 * 0,003348 = 50,6 \text{ m}^3/\text{h} \quad (13)$$

3. Konstantní Stokesovo číslo

$$u_{1,1} = 8 \text{ m/s} \quad (14)$$

$$Stk_1 = D_{50} \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho) u_{1,1}}{\mu D_{c,1}}} \quad (15)$$

$$Stk_2 = D_{50} \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho) u_{1,2}}{\mu D_{c,2}}} \quad (16)$$

$$Stk_1 = Stk_2 = \frac{u_{1,1}}{D_{c,1}} = \frac{u_{1,2}}{D_{c,2}} \quad (17)$$

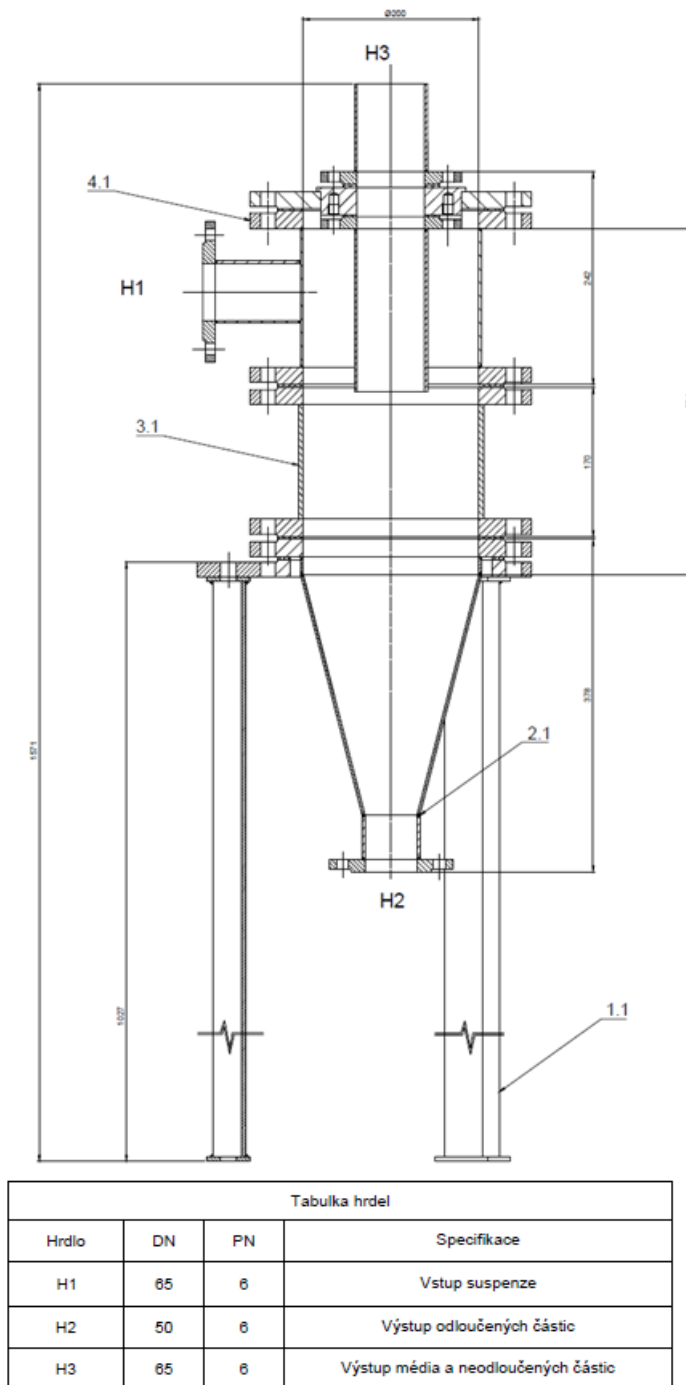
$$u_{1,2} = u_{1,1} \frac{D_{c,2}}{D_{c,1}} = 8 \frac{200}{726} = 2,2 \text{ m/s} \quad (18)$$

$$V_{1,2} = 3600 u_{1,2} S_{1,2} = 3600 * 2,2 * 0,003348 = 26,5 \text{ m}^3/\text{h} \quad (19)$$

Pro první možnost kritéria konstantní vstupní rychlosti jsou zapotřebí velké průtoky a bylo by nutné použít výkonnější čerpadlo. Roste také tlaková ztráta, která by se musela promítnout do dimenzování konstrukce, a proto nebudeme nadále toto kritérium uvažovat.

Podle výpočtu pro požadované průtoky během experimentu a podle maximální hodnoty se vybíralo čerpadlo. Maximální průtok pro potřeby experimentu je $V_1 = 50,6 \text{ m}^3/\text{h}$ při vstupní rychlosti $u_1 = 4,2 \text{ m/s}$. Použité čerpadlo má maximální výkon $50 \text{ m}^3/\text{h}$, a proto je doplněno frekvenčním měničem pro navýšený maximálního výkonu na $70 \text{ m}^3/\text{h}$ a také z důvodu snadné regulace průtoku.

4.4. Konstrukce laboratorního hydrocyklonu



Obrázek 13: Výkres soustavy hydrocyklonu

Konstrukce laboratorního hydrocyklonu (obr.13) byla navržena s ohledem na snadnou variabilitu jednotlivých dílů. Cyklon je rozdělený na 3 díly – vstup s víkem a přepadovou trubicí, válcová část a kuželová část. Další díl je třínohá nosná konstrukce.

Všechny díly jsou opatřeny spojovacími přírubami a lze tedy jednoduše jednotlivé díly nahradit. Dělená konstrukce byla volena jako příprava pro další experiment, při kterém se

v rámci optimalizace sleduje vliv jednotlivých geometrických parametrů na odlučivost. Je možné sledovat například štíhlost cyklonu, velikost vstupního otvoru nebo přepadové trubky. Záměna jednotlivých dílů je ekonomičtější než výroba celého zařízení odlišné geometrie a modulární koncepce umožňuje otestování velkého počtu kombinací.

Jak již bylo řečeno, geometrie je zachována ve zmenšeném měřítku. Na to bylo třeba pamatovat převážně kvůli přírubám, aby byly rozměry opravdu zachovány a byla zachována relevantnost experimentu.

Hydrocyklon je tlaková nádoba a z výpočtů by provozní tlak neměl přesáhnout hodnotu 3 – 4 bar-g. Návrhová teplota je 20°C. Za materiál pro všechny díly byla zvolena nerezová ocel 1.4301, jednak kvůli požadavkům na tlakovou nádobu, ale také aby materiál byl otěruvzdorný vůči abrazivnímu působení částic.

Pevnostní výpočet klíčových částí byl proveden podle normy pro tlakové nádoby ČSN 69 0010 [2] a nachází se v příloze (8).

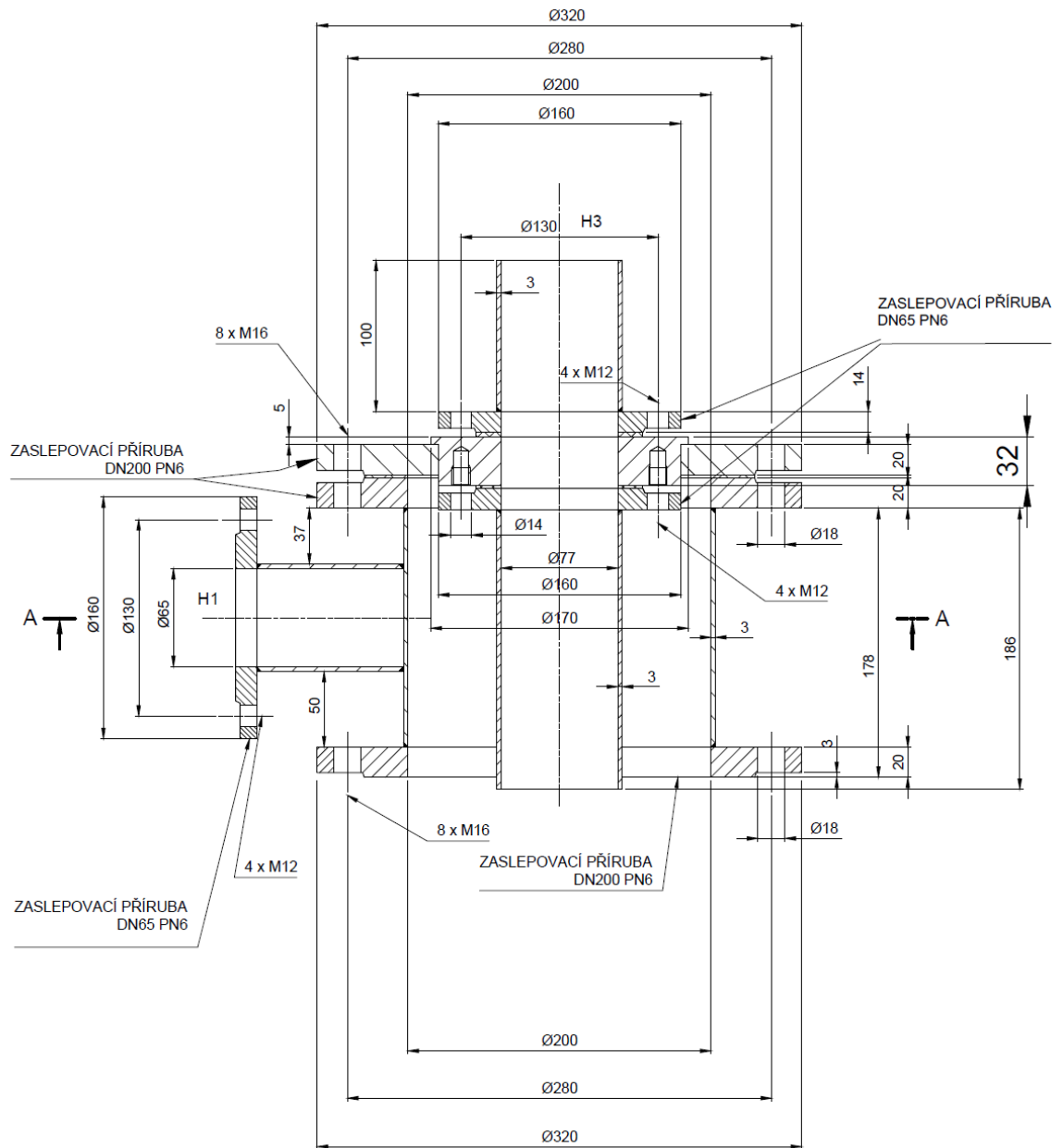
4.5. Popis jednotlivých dílů

Výrobní výkresy všech dílů i soustavy jsou k dispozici v příloze (7).

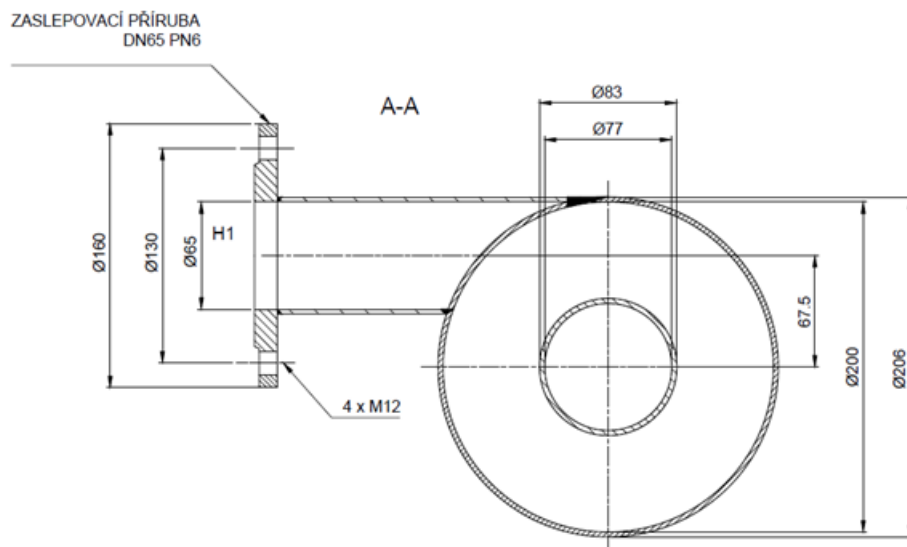
Všechny díly hydrocyklonu jsou opatřeny spojovací přírubou DN200 PN6 pro potenciální kompatibilitu s jinými díly. Pro tyto spoje se používají šrouby M16. Menší příruby o rozměrech DN65 PN6 a DN50 PN6 slouží jako spojovací místo s přívodními nebo odvodními trubkami a jsou opatřeny šrouby M12.

Tloušťka stěn je dána pevnostním výpočtem a byla všude stanovená na 3 mm.

Vrchní díl (obr.14) je opatřen tangenciálním vstupem H1 (obr.15), který je zakončen přírubou pro snadné spojení s přívodní trubkou. Víko je také opatřené systémem přírub, pokud by bylo zapotřebí výměny přepadové trubky H3.



Obrázek 14: Vrchní díl

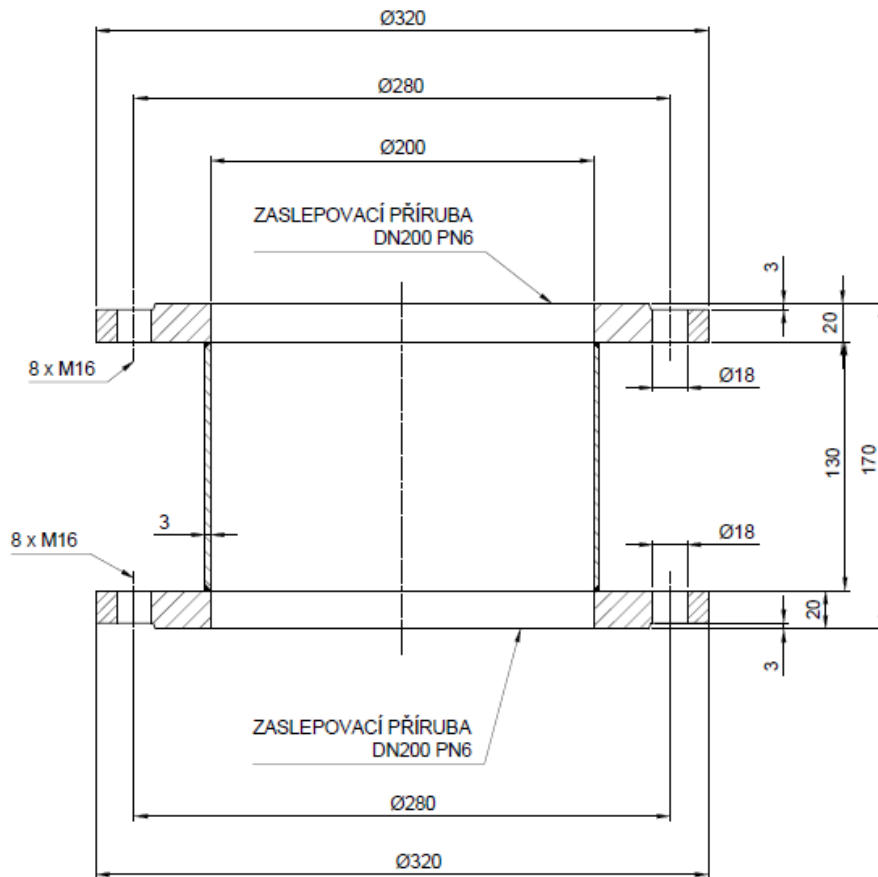


Tabulka hrdel			
Hrdlo	DN	PN	Specifikace
H1	65	6	Vstup suspenze
H3	65	6	Výstup média a neodloučených částic

PRACOVNÍ PARAMETRY	
PRACOVNÍ TEPLOTA	20°C
PRACOVNÍ PŘETLAK	3,5 bar
MATERIÁL	1.4301
MÉDIUM	voda a částice koxu (3%)
HUSTOTA ČÁSTIC	1250 kg/m ³

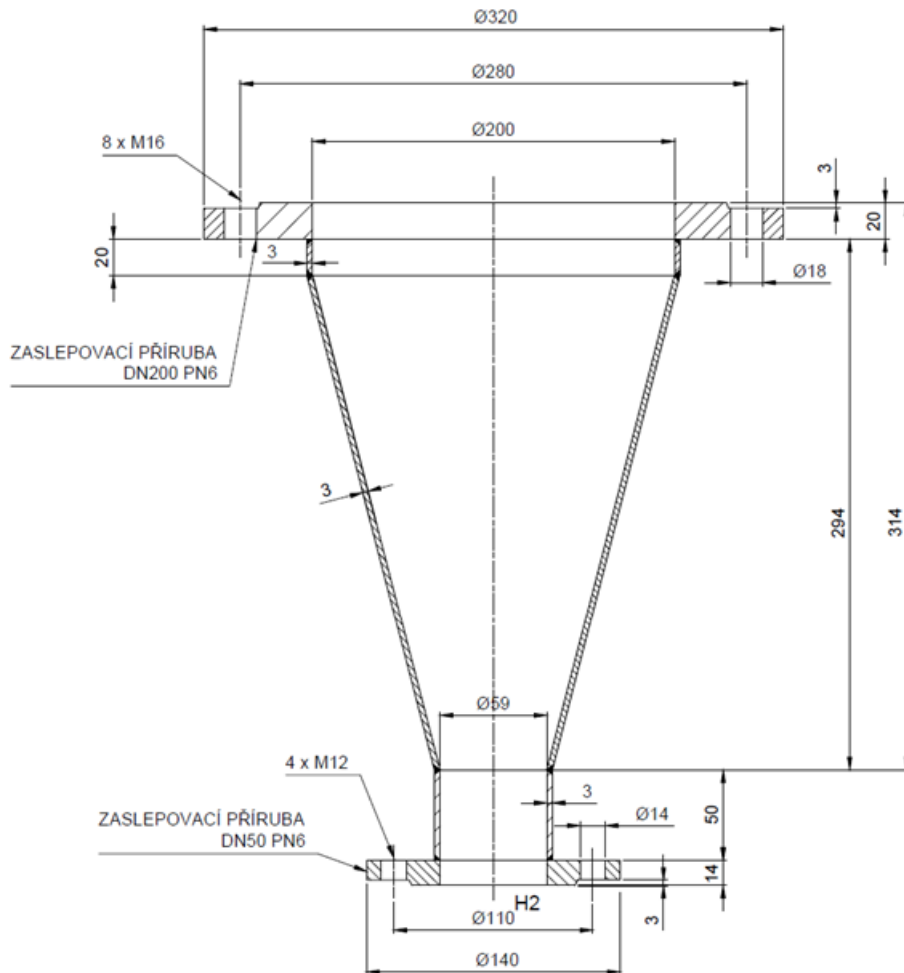
Obrázek 15: Řez vrchního dílu, pohled na tangenciální vstup

Válcová část je velmi jednoduchá konstrukce opatřena pouze spojovacími přírubami (obr. 16).



Obrázek 16: Válcový díl

U kuželové části (obr.17) se z výrobních důvodů volil válcový předěl mezi horní přírubou a kuželovou částí. To samé řešení je u spodní příruby H2, kde prodloužená část slouží i jako záchytné místo pro odloučené částice v průběhu experimentu. Spodní příruba je poté propojena k uzavíracímu ventilu, který je v průběhu experimentu uzavřen.

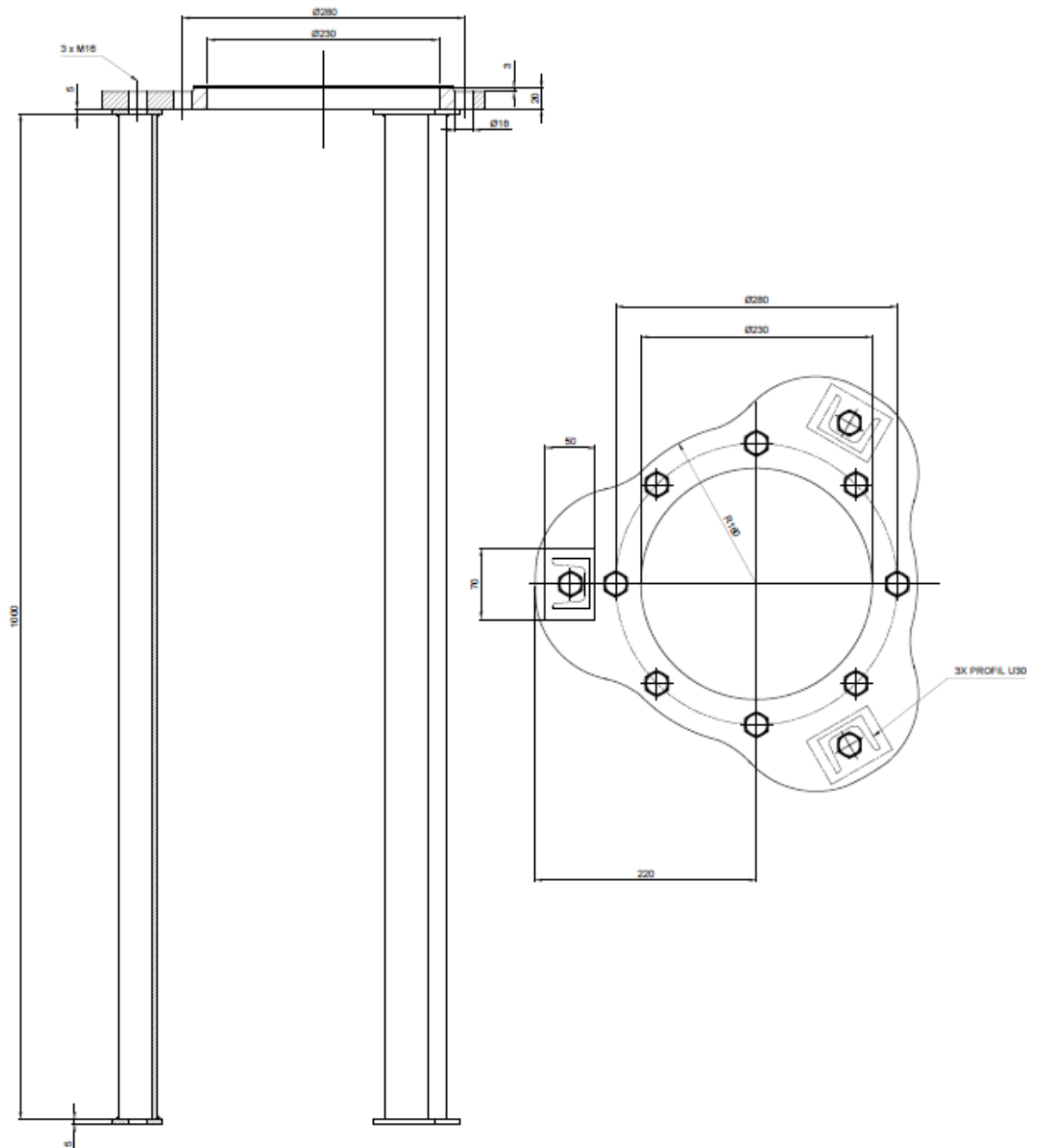


Tabulka hrdel			
Hrdlo	DN	PN	Specifikace
H2	50	6	Výstup odloučených částice

PRACOVNÍ PARAMETRY	
PRACOVNÍ TEPLOTA	20°C
PRACOVNÍ PŘETLAK	3,5 bar
MATERIÁL	1.4301
MÉDIUM	voda a částice koxu (3%)
HUSTOTA ČÁSTIC	1250 kg/m ³

Obrázek 17: Kuželový díl

Nosná konstrukce (obr.18) je pro svou jednoduchost volena jako příruba se třemi nosnými nohama z profilu U30. Délka noh je dimenzována tak, aby se pod hydrocyklon vešel i uzavírací ventil a sběrná nádoba na odloučené částice. Z důvodů jednoduchosti byl volen stejný materiál nosné konstrukce jako pro těleso hydrocyklonu, tedy nerezová ocel 1.4301.



Obrázek 18: Nosná konstrukce

Na základě připravené výkresové dokumentace byla zadána výroba jednotlivých dílů firmě VSK Pardubice, vyrobené díly jsou zobrazeny na obr.19.



Obrázek 19: Fotografie z montáže laboratorního zařízení

5. Popis laboratorního experimentu

Po návrhu zařízení a experimentálního okruhu byla podle výrobní dokumentace zajištěna výroba jednotlivých dílů hydrocyklonu u externího dodavatele, a poté byla provedena montáž a sestavení celé linky podle PID schématu v laboratořích ústavu 12118 Fakulty strojní ČVUT.

5.1. Prvky experimentálního okruhu

Experimentální okruh se skládá z hydrocyklonu, dvou přečerpávacích nádrží, dvou čerpadel, propojovacích plastových trubek a prvků na měření a regulaci.



Obrázek 20: Experimentální okruh (1)



Obrázek 21: Experimentální okruh (2)

Popis částí experimentálního okruhu (obr. 20. a 21.):

1 – Laboratorní hydrocyklon (B103)

2 – Vstupní trubka do hydrocyklonu pro suspenzi

3 – Výstupní trubka z hydrocyklonu pro médium s neodloučenými částicemi

4 – Výstupní trubka z hydrocyklonu pro odloučené částice, uzavírací ventil

5 – Míchaná nádoba s míchadlem (B101) PP - MOK 1.3

Objem: 1300 litrů

6 – IBC nádrž na médium s neodloučenými částicemi (B104)

Objem: 1000 litrů

7 – Průtokoměr

8 – Digitální manometr

9 + 10 – Odstředivé procesní čerpadlo (P102) s frekvenčním měničem

11 – Trubka pro přívod suspenze z míchané nádoby do čerpadla

12 – Vřetenové přečerpávací čerpadlo (P105)

5.2. Měření a regulace, PID schéma

Laboratorní experiment se skládá z několika částí, které je třeba opatřit prvky pro měření a regulaci, konkrétně měření tlaku a průtoku. Čerpadlo je doplněno frekvenčním měničem pro snadnou regulaci průtoku a pro zvýšení čerpacího výkonu. Dále okruh obsahuje ventily a kohouty pro snadné přestavení okruhu, např. při vypouštění.

Tlakoměr i průtokoměr jsou umístěné před vstupem do hydrocyklonu, při experimentu se reguluje rychlost, respektive průtok, na vstupu. Tlakoměr umístěný před vstupem měří přetlak, tedy i tlakovou ztrátu na cyklonu.

Umístění měřících a regulačních prvků je zobrazeno v PID schématu (obr. 22).

Specifikace zařízení:

7 – Průtokoměr OPTIFLUX 1050 C

Rozsah: 0 – 100 m³/h

Přesnost: ± 0,5% z měřené hodnoty ± 1 mm/s

8 – Digitální manometr BD SENSORS DM 10

Rozsah: 0 – 6 bar

Přesnost: 0,5 % FSO BFSL (třída 0,5)

9 + 10 – Odstředivé čerpadlo (P102) s frekvenčním měničem

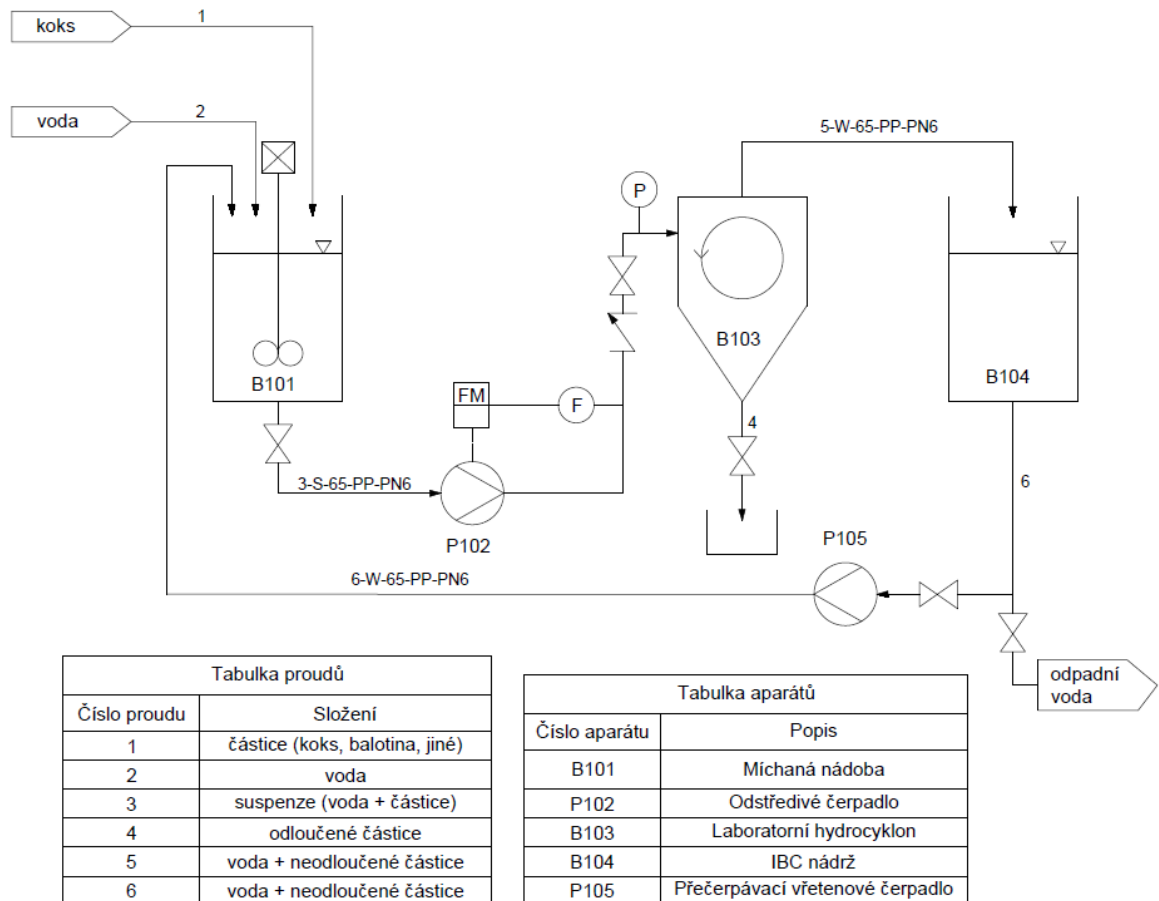
Průtok: 50 m³/h, s frekvenčním měničem max. 70 m³/h

Maximální výtlač: 3,2 bar

12 – Vřetenové čerpadlo (P105)

Čerpané množství: 2,4 m³/h

Maximální výtlak: 2 bar



Tabulka proudů	
Číslo proudu	Složení
1	částice (koks, balotina, jiné)
2	voda
3	suspenze (voda + částice)
4	odloučené částice
5	voda + neodloučené částice
6	voda + neodloučené částice

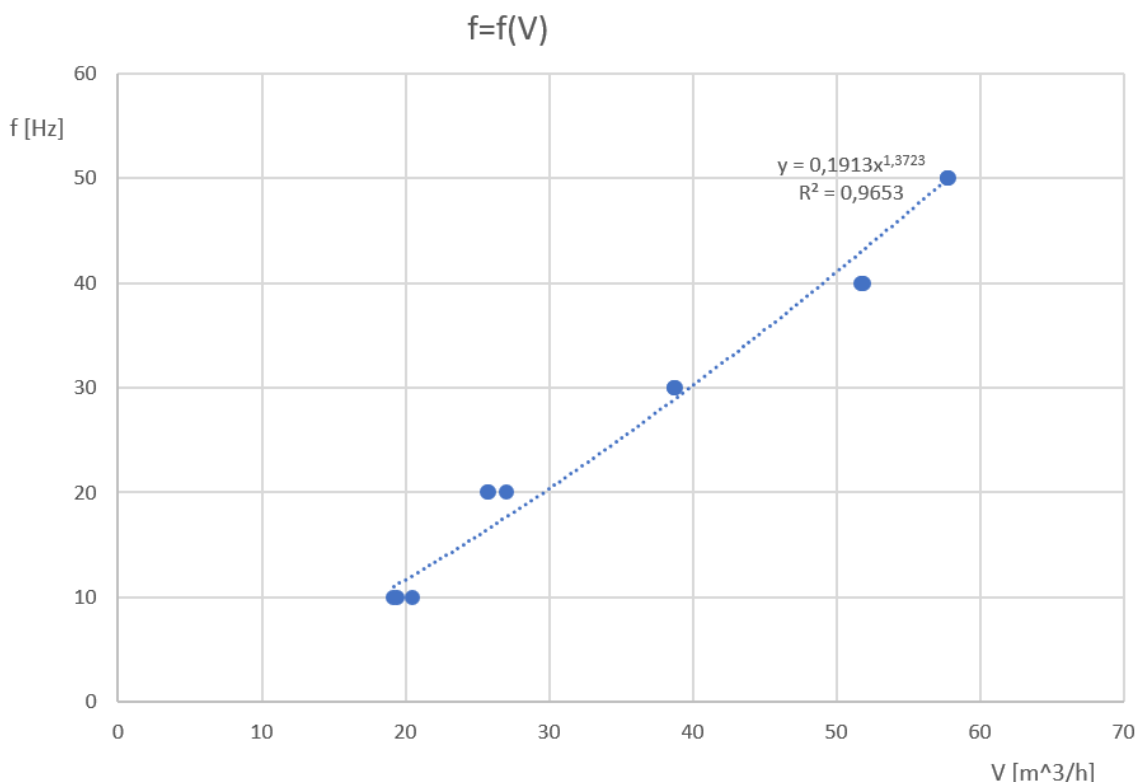
Tabulka aparátů	
Číslo aparátu	Popis
B101	Míchaná nádoba
P102	Odstředivé čerpadlo
B103	Laboratorní hydrocyklon
B104	IBC nádrž
P105	Přečerpávací vřetenové čerpadlo

Obrázek 22: Konečné PID schéma experimentu

6. Experimentální měření

6.1. Kalibrace frekvenčního měniče

Před provedením samotného experimentu je potřeba zkalibrovat průtokoměr s frekvenčním měničem (obr. 23). Míchaná nádoba byla napuštěna vodou a čerpadlem byla hnána do cyklonu. Na frekvenčním měniči se postupně nastavovaly hodnoty 10, 20, 30, 40, 50 Hz a zapisovaly se příslušné hodnoty průtoku. Výpočet kalibrace je v příloze (5) na listu „kalibrace fr. měniče“.



Obrázek 23: Kalibrační křivka

6.2. Popis experimentu s reálnou suspenzí s částicemi koksu:

Pro každý experiment je vstupní objem suspenze přibližně 1m³. Doba samotného experimentu je pro vyšší průtok (50,6 m³/h) 1-2 minuty, pro nižší průtok (26,5 m³/h) 3 minuty.

- 1) Odvážení 1kg částic koksu,
- 2) zapnutí míchadla,
- 3) napuštění míchané nádoby vodou,

- 4) přimíchání koksu do míchané nádoby,
- 5) důkladné rozmíchání částic pro homogenizaci suspenze,
- 6) nastavení hodnoty frekvence na frekvenčním měniči, která odpovídá požadované hodnotě průtoku, tj. 26,5 m³/h nebo 50,6 m³/h,
- 7) spuštění čerpadla za stálého míchání,
- 8) přečerpání veškeré suspenze z míchané nádoby přes hydrocyklon do IBC nádrže,
- 9) vypnutí čerpadla,
- 10) umístění sběrné nádoby pod cyklon a otevření ventilu pro odloučené částice,
- 11) vysypání/ vypláchnutí odloučených částic do sběrné nádoby,
- 12) odstranění přebytečné vody ze sběrné nádoby a následné sušení částic,
- 13) odebrání vzorku vody s neodloučenými částicemi z IBC nádrže pro laserovou analýzu velikosti částic,
- 14) vypuštění IBC nádrže,
- 15) opakování měření pro druhou hodnotu průtoku,
- 16) vysušení vzorků
- 17) analýza velikosti částic síťovou metodou a analýza odlučivosti zvážením vzorků.



Obrázek 24: IBC nádrž s neodloučenými částicemi

6.3. Popis experimentu s modelovou suspenzí se skleněnou balotinou:

Poslední experiment byl provedený se vzorkem skleněné balotiny č.159.

- 1) Odvážení 1kg skleněné balotiny,
- 2) zapnutí míchadla,
- 3) napuštění míchané nádoby vodou,
- 4) přimíchání balotiny do míchané nádoby,
- 5) důkladné rozmíchání částic pro homogenizaci suspenze,
- 6) nastavení hodnoty frekvence na frekvenčním měniči, která odpovídá požadované hodnotě průtoku, tj. 26,5 m³/h nebo 50,6 m³/h,
- 7) spuštění čerpadla za stálého míchání,
- 8) přečerpání veškeré suspenze z míchané nádoby přes hydrocyklon do IBC nádrže,
- 9) vypnutí čerpadla,
- 10) umístění sběrné nádoby pod cyklon a otevření ventilu pro odloučené částice,
- 11) vysypání/ vypláchnutí odloučených částic do sběrné nádoby,
- 12) odstranění přebytečné vody ze sběrné nádoby a následné sušení částic,
- 13) vypuštění IBC nádrže,
- 14) opakování měření pro druhou hodnotu průtoku
- 15) vysušení vzorků
- 16) analýza odlučivosti zvážením vzorků.

7. Měření velikosti částic

7.1. Sítová analýza

Nejjednodušší metodou měření velikosti částic je sítová analýza, pomocí které můžeme získat i distribuci rozložení velikosti částic.

V rámci analýzy bylo změřeno distribuční rozdělení i pro vzorek částic, které vstupují do cyklonu.

Sítová analýza probíhala pro všechny vzorky stejným způsobem. Nejprve se použila sada i s jemnějšími sítý – velikost ok sít: 0,850; 0,600; 0,450; 0,355; 0,280; 0,200; 0,106 [mm] a záchytná miska pro nejjemnější frakce. V druhém kroku se odebraly vyseparované částice z horního nejhrubšího síta (rozměr ok 0,850 mm) a byly použity pro měření na sadě sít s hrubšími oky – 5; 2,5; 0,8 [mm] a sběrná miska.

7.1.1. Měřené vzorky

Po provedení experimentu se odloučené částice vypláchly z hydrocyklonu a několik hodin se sušily při teplotě 105°C, dokud sušením vzorky nedosáhly konstantní hmotnosti. Poté se vzorky zvažily.

Vzorek částic, který nám byl poskytnut z technologie, obsahuje také menší množství uhlovodíkových částic (viz. žluté částice na obr. 25). Pro zjednodušení předpokládáme, že tyto částice mají stejné vlastnosti jako částice koksu.



Obrázek 25: Vysušené odloučené částice koksu a příměsi z technologie

7.1.2. Měřící zařízení

Sada sít

- Sada s jemnějšími oky – velikost ok: 0,850; 0,600; 0,450; 0,355; 0,280; 0,200; 0,106 [mm] a sběrná miska
- Sada s hrubšími oky – velikost ok: 5; 2,5; 0,8 [mm] a sběrná miska

Vibrační stroj: JBS IVEX, VP 200 (obr.26)

Laboratorní váhy: SCALTEC

- Přesnost 0,1g



Obrázek 26: Vibrační stroj se sadou sít

7.1.3. Postup měření

Prázdná síta se zváží na váze a poté se sada sestavila vzestupně od nejjemnějšího síta po nejhrubší. Na vrchní síto se vysypal vzorek částic, sada se uzavřela a upevnila na vibrační stroj. Střásání bylo nastaveno na 15 minut a po uplynutí této doby se sada rozebrala a jednotlivá síta s příslušnou frakcí částic se znovu zvážíla (obr.27).

Poté se vzala nejhrubší frakce z vrchního síta a stejný proces se opakoval na sadě s hrubými oky.



Obrázek 27: Ukázka jemné frakce na sítu s oky 0,106 mm

7.1.4. Vyhodnocení měření

Kompletní výpočet a naměřené hodnoty se nachází v příloze (5).

Hmotnost zrn:

$$hmotnost\ zrn\ i = hmotnost\ síta\ a\ zrn_i - hmotnost\ síta_i [g] \quad (20)$$

Hmotnostní zlomek:

$$x_i = \frac{hmotnost\ zrn\ i}{celková\ hmotnost} [-] \quad (21)$$

Střední průměr zrna:

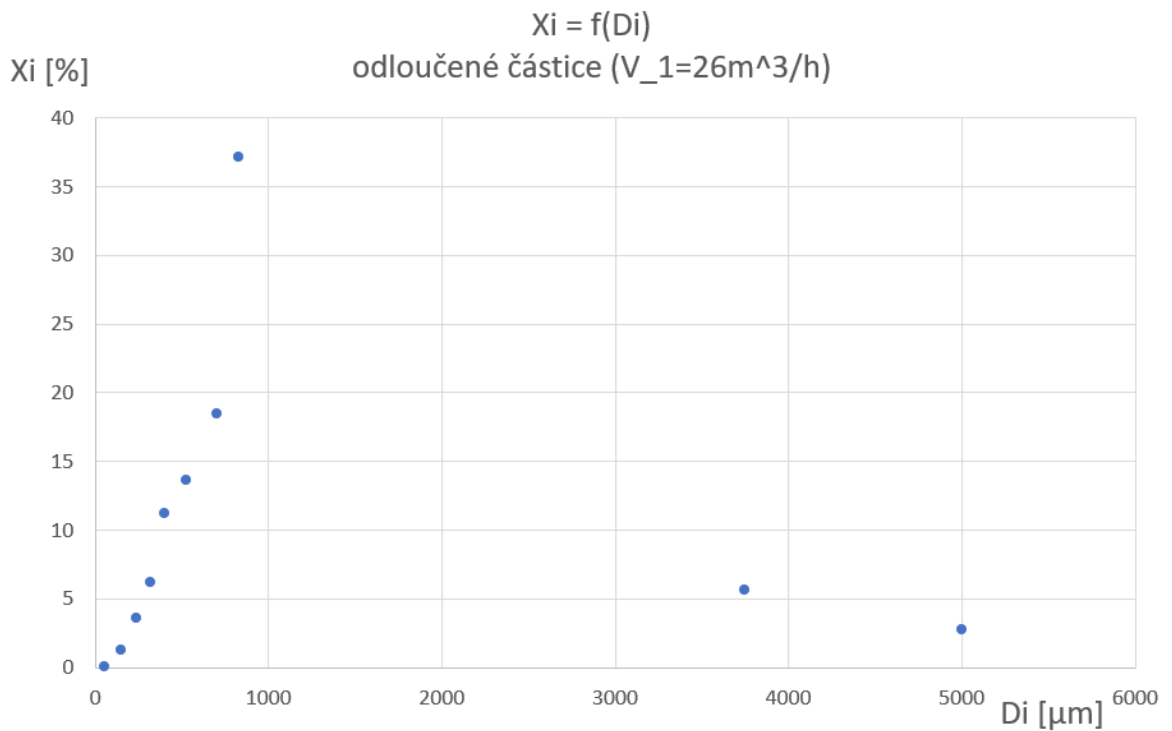
$$a_i = \frac{průměr\ síta\ i + průměr\ síta\ i-1}{2} \quad (22)$$

Distribuční funkce podle hmotnosti:

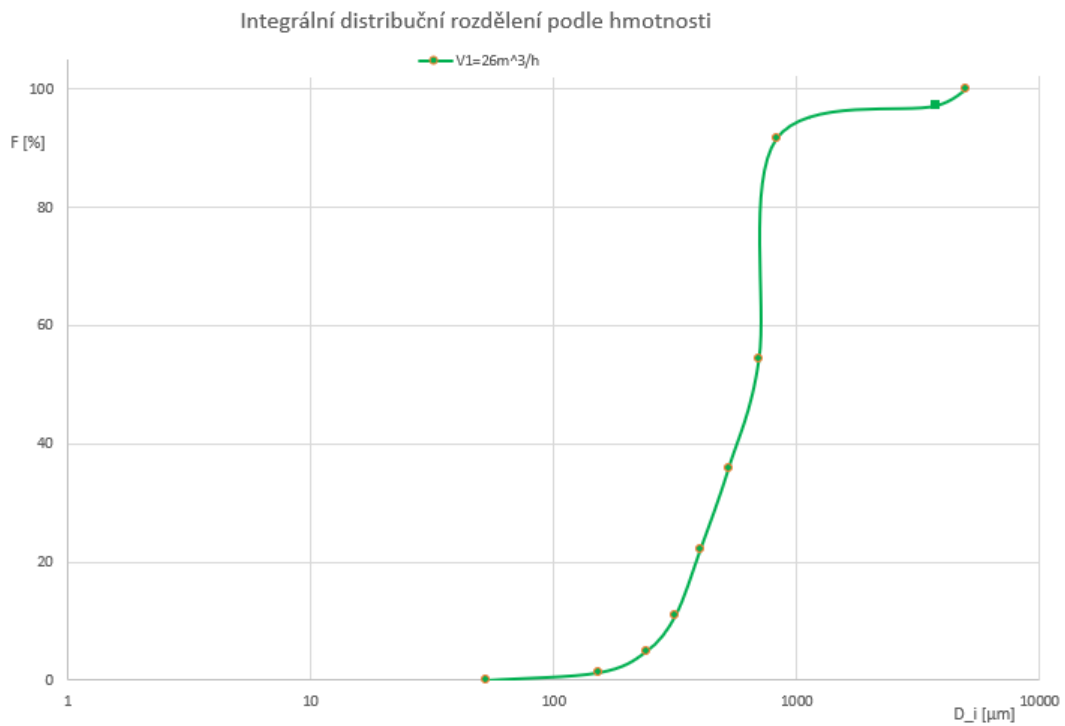
$$F_i = \sum_{k=i}^i X i_k \quad (23)$$

1) vzorek odloučených částic – kritérium konstantního Stokesova čísla

Průtok: $V_1=26 \text{ m}^3/\text{h}$



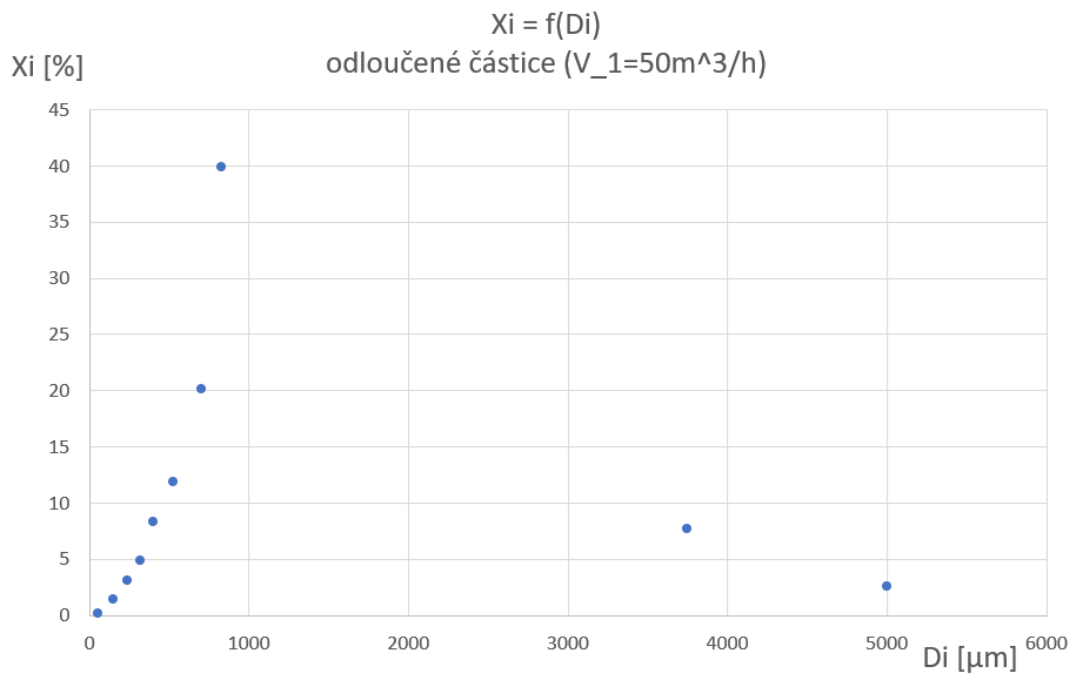
Obrázek 28: Distribuční rozdělení částic podle hmotnosti pro $V_1=26 \text{ m}^3/\text{h}$



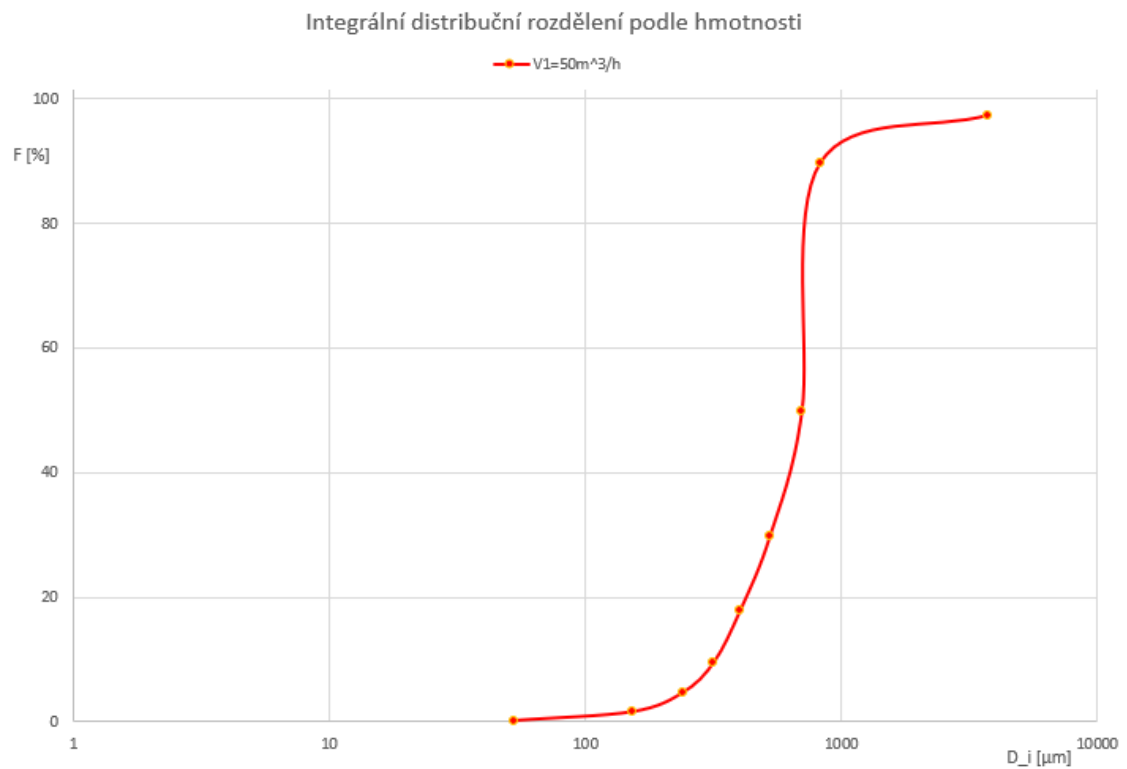
Obrázek 29: Integrální distribuční rozdělení částic podle hmotnosti pro $V_1=26 \text{ m}^3/\text{h}$

2) vzorek odloučených částic – kritérium konstantního odstředivého zrychlení

Průtok: $V_1=50 \text{ m}^3/\text{h}$

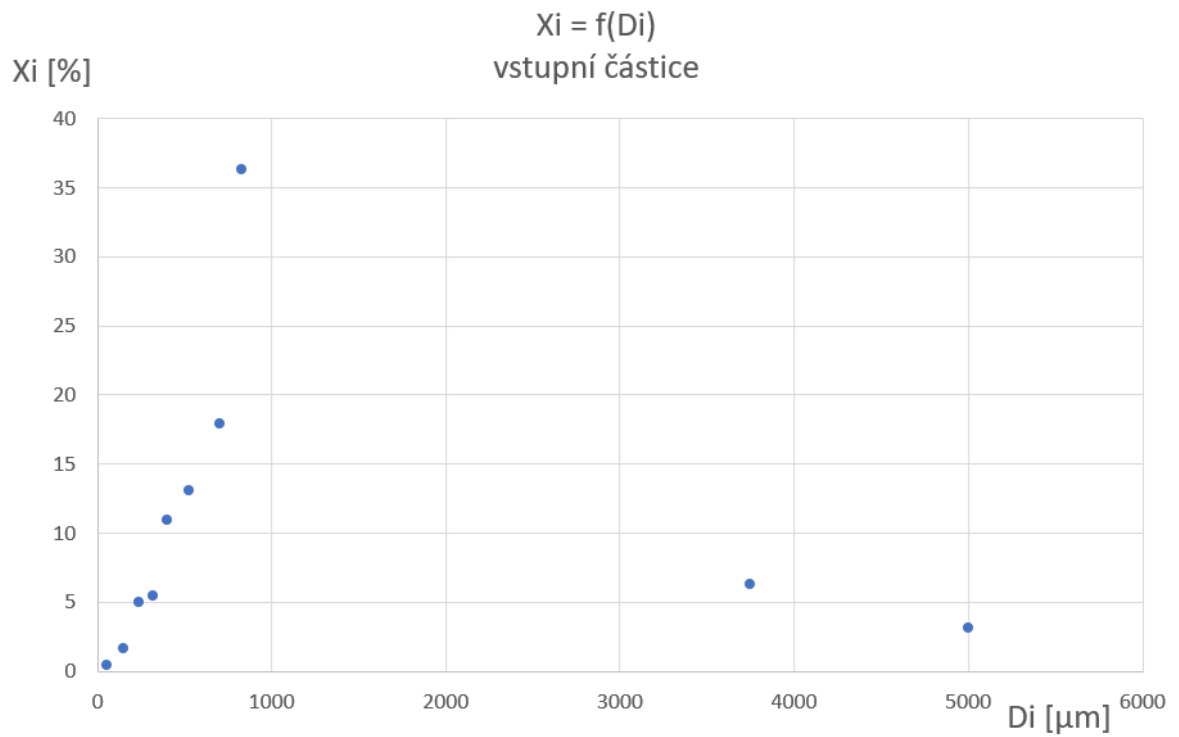


Obrázek 30: Distribuční rozdělení částic podle hmotnosti pro $V_1=50 \text{ m}^3/\text{h}$

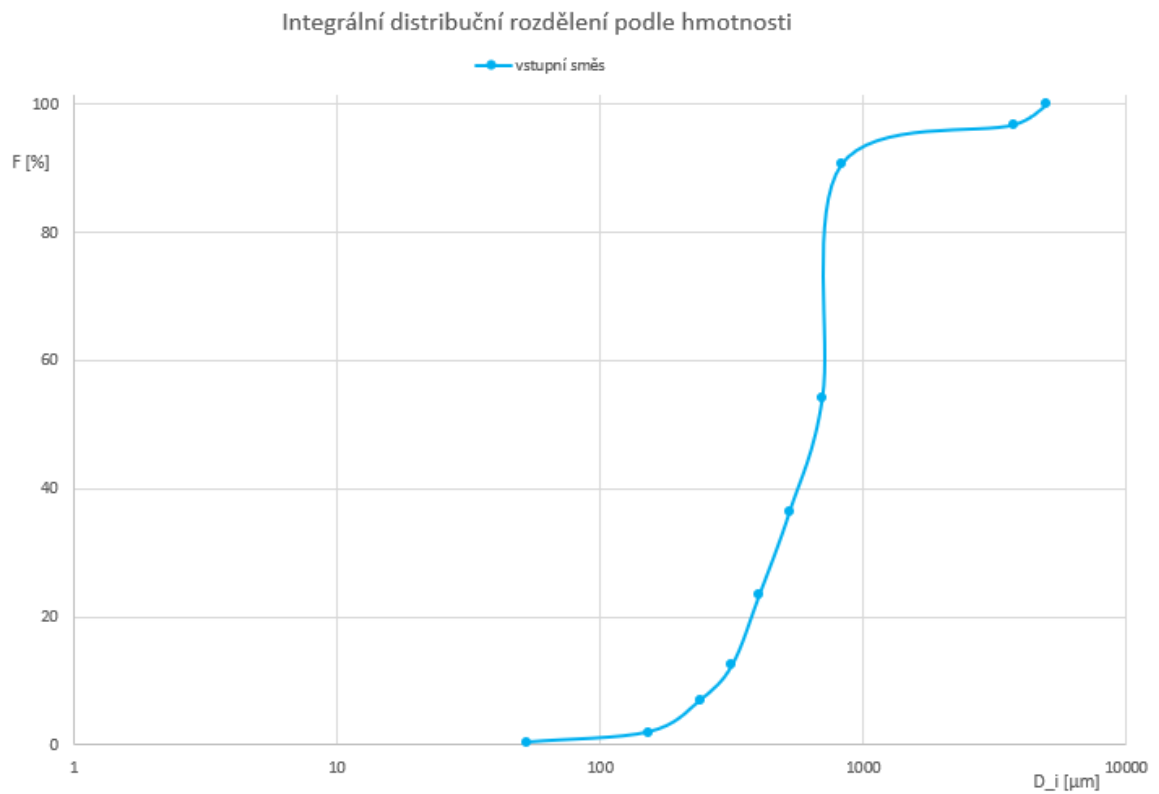


Obrázek 31: Integrální distribuční rozdělení částic podle hmotnosti pro $V_1=50 \text{ m}^3/\text{h}$

3) vzorek vstupní směsi částic



Obrázek 32: Distribuční rozdělení částic podle hmotnosti pro vstupní směs částic



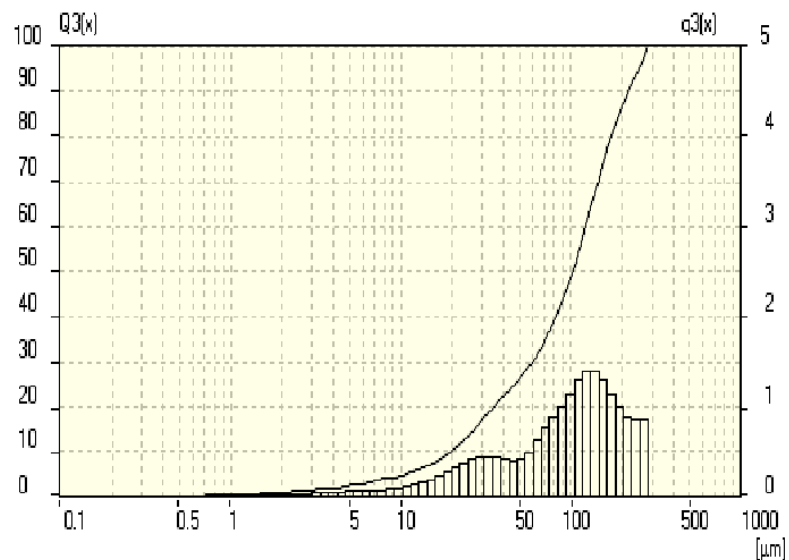
Obrázek 33: Integrální distribuční rozdělení částic podle hmotnosti pro vstupní směs částic

7.2. Laserová analýza

Pro výpočet distribučního rozložení velikosti odloučených částic stačí provést síťovou analýzu, ale neodloučené částice jsou dominantně zastoupeny jemnější frakcí. Pro získání podrobnějších informací o jejich distribuci je zapotřebí provést analýzu pomocí laserového analyzátoru.

Laserová analýza byla provedena pro vzorek neodloučených částic, odběrné místo byla IBC nádrž. Měření probíhalo na laserovém analyzátoru FRITSCH ANALYSSETE COMPACT A22.

Naměřená data (obr. 34) a jejich vypracování jsou obsažena v příloze (5), protokol z analyzátoru v příloze (9).

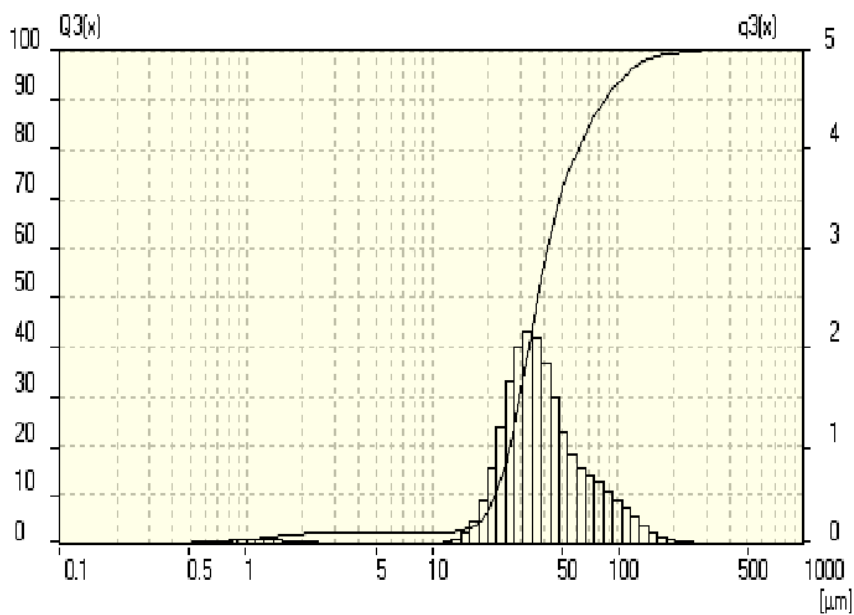


Obrázek 34: Integrální distribuční rozdělení částic podle hmotnosti pro neodloučené částice

7.3.Ověřovací experiment s balotinou

Poté co bylo provedeno měření a vyhodnocení pokusů s částicemi koksu, provedlo se ještě kontrolní měření pomocí skleněné balotiny. Tento krok měl za úkol ověřit odlučivost cyklonu pro jemné frakce. Jelikož v poměrném zastoupení vzorku koksu je relativně malé procento jemných frakcí, byla použita skleněná balotina č.159. Tento vzorek částic je brán jako téměř monodisperzní a na analyzátoru A22 byla změřena distribuce částic (obr.35).

Naměřená data a jejich vypracování jsou obsažena v příloze (6), protokol z analyzátoru v příloze (10).



Obrázek 35: Distribuce velikosti částic balotiny (viz příloha 8)

8. Analýza výsledků

8.1. Tlaková ztráta, ztrátový součinitel

Z průmyslové aplikace jsou k dispozici naměřené hodnoty tlakové ztráty pro pět referenčních průtoků. Pro tyto průtoky byla hodnota tlakové ztráty i vypočtena a jejich porovnání je v tabulce 1. Je vidět, že hodnoty se lehce liší, což může být způsobeno nepřesným stanovením dílčích hydraulických odporů cyklonu a nepřesným výpočtem rychlostního pole. Nicméně pro rámcové ověření matematického modelu vypočtené hodnoty přibližně odpovídají naměřeným hodnotám.

Z hodnoty tlakové ztráty lze podle rovnice (24) vypočítat ztrátový součinitel cyklonu ζ_c pro charakteristickou rychlost suspenze vztaženou na válcovou část cyklonu. Střední hodnota $\zeta_c = 815$ je vypočtená z průmyslových měření a přibližně odpovídá hodnotě $\zeta_c = 770$ vypočtené na základě matematického modelu pro stejné průtoky.

Výpočet je vztažen na průměr válcové části $D_c = 726$ mm.

$$\Delta p_z = \zeta_c \frac{u_{ch}^2}{2} \rho_{kap} \quad (24)$$

Tabulka 1: Výpočet a porovnání hodnot ζ_c a tlakové ztráty (hodnoty z průmyslu, mat. model)

Průtok V_1		u_ch	Δp_z naměřená z průmyslu		ζc průmysl	Δp_z vypočtená z mat. modelu	ζc mat.model
[t/h]	[m ³ /s]	[m/s]	[bar]	[Pa]	[-]	[Pa]	[-]
2100	0,583333	1,41	5,25	525000	531	480458	486
1050	0,291667	0,70	2,25	225000	911	213864	866
950	0,263889	0,64	1,85	185000	915	175885	870
700	0,194444	0,47	0,98	98000	893	93051	848
525	0,145833	0,35	0,51	51000	826	48216	781
			ζc_střední:		815		770

Stejné porovnání bylo provedeno i pro ztrátový součinitel a pro tlakovou ztrátu naměřenou během laboratorního experimentu vůči vypočtené hodnotě z matematického modelu (viz tabulka 2). Tlaková ztráta v rámci experimentu byla stanovena při měření pouze s vodou (ne se suspenzí), neboť zvolené snímače neumožňovaly měření s částicemi.

Výpočet je opět podle rovnice (24) a je vztažen na průměr válcové části $D_c = 200$ mm.

Tabulka 2: Výpočet a porovnání hodnot ζ_c a tlakové ztráty (hodnoty z experimentu, mat. model)

Průtok V_1		u_ch [m/s]	Δp_z naměřená z experimentu		ζ_c experiment [-]	Δp_z vypočtená z mat. modelu [Pa]	ζ_c mat.model [-]
[t/h]	[m ³ /s]		[bar]	[Pa]			
96,4	0,027	0,85					
50,6	0,014	0,45	1,05	96000	964	76649	769
26,6	0,007	0,23	0,3	25000	911	21127	770
			ζ_c střední:		937		770

Při experimentu se měří tlaková ztráta mezi vstupem a výstupem z cyklonu. Naměřené hodnoty (Δp_z i ζ_c) odpovídají výpočtovému modelu, odchylka může být způsobena nepřesným nastavením parametrů modelu.

Matematický model sedí i s průmyslovými hodnotami a pro tento typ cyklonu je možné počítat s hodnotou ztrátového součinitele $\zeta_c = 800 - 900$ (vztaženo na charakteristickou rychlost ve válcové části). Matematický model, který zavádí mnoho zjednodušení, je možné použít nejen k predikci odlučivosti, ale je možné na jeho základě stanovit predikci tlakové ztráty.

8.2. Vyhodnocení odlučivosti s průmyslovou suspenzí

8.2.1. Zpracování experimentálních dat – celková odlučivost s průmyslovou suspenzí

Z podstaty provedení experimentu je možné velmi jednoduše měřit celkovou odlučivost hydrocyklonu za použití hmotnostní bilance:

$$m_{\text{neodloučené částice}} = m_{\text{vstupní částice}} - m_{\text{odloučené částice}} \quad (25)$$

Pro každé měření se míchaná nádoba, která slouží jako zdroj suspenze pro měření, zaplnila vodou a bylo přidáno 1000 g částic. Po proběhnutí experimentu se odloučené částice vysušily a zvažily. Absolutní odlučivost lze vypočítat jako:

$$\varphi = \frac{m_{\text{odloučené částice}}}{m_{\text{vstupní částice}}} * 100 [\%] \quad (26)$$

Tabulka 3: Celková odlučivost hydrocyklonu s průmyslovou suspenzí

průtok	rychlost na vstupu	hmotnost částic		odlučivost
		na vstupu	na výstupu	
[m ³ /h]	[m/s]	[g]	[g]	[%]
26	2,2	1000	904,9	90,5
50	4,2	1000	990,3	99

První experimentální měření na cyklonu pro průtok 26 m³/h, a tedy pro kritérium konstantního Stokesova čísla, se z množství vstupních částic o hmotnosti 1000g odloučilo 904,9 g částic, což představuje 90,5% odlučivost (tab. 3).

V rámci druhého měření na cyklonu pro průtok 50 m³/h, a tedy pro kritérium konstantního odstředivého zrychlení, se z množství vstupních částic o hmotnosti 1000g odloučilo 990,3 g částic, což představuje 99% odlučivost.

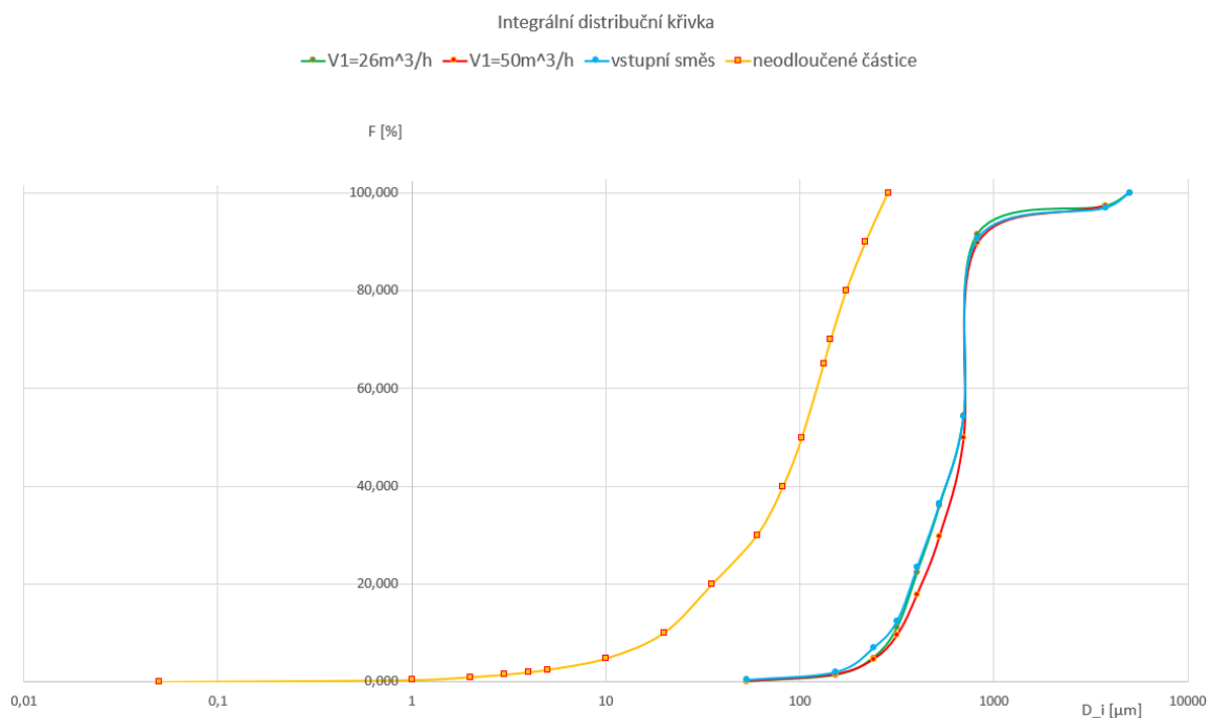
Z rozložení distribuce velikosti částic je zřejmé, že ve výstupním proudu neodloučených částic prakticky nebyly částice větší než 300μm a z výpočtového modelu je vidět, že teoretická odlučivost pro částice 300μm je 99,5% pro kritérium konstantního odstředivého zrychlení, zatímco pro konstantní Stokesovo číslo jen 78% odlučivost této frakce. Hodnota pro kritérium konstantního odstředivého zrychlení je velmi dobrá a indikuje správnost matematického modelu, zatímco hypotéza pro konstantní Stokesovo číslo má horší shodu mezi výpočty a experimentálním ověřením.

8.2.2. Zpracování experimentálních dat – velikost částic

Na obrázku 36 je zobrazena integrální distribuční křivka pro všechny čtyři experimentální měření (síta i laser) (příloha (5)).

V případě analýzy odloučených částic je vidět, že hrubší frakce se kompletně odloučila a ve výstupním proudu je jen malý podíl jemné frakce. Z hmotnostní bilance pro průtok $50 \text{ m}^3/\text{h}$ vyšla vysoká 99% odlučivost. Pro tento průtok je podíl neodloučené jemné frakce pouze 1%.

Laserová analýza potvrdila, že neodloučené částice obsahují převážně jemné frakce. Největší procentuální zastoupení neodloučených částic měla frakce o rozměrech přibližně $150 \mu\text{m}$.



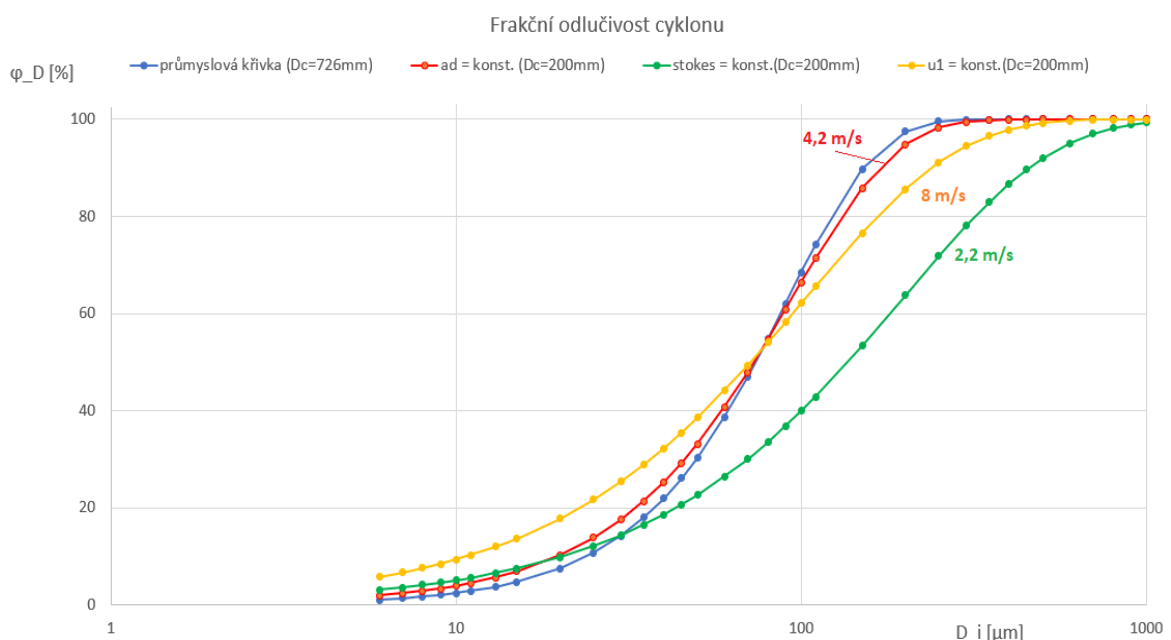
Obrázek 36: Integrální distribuční křivka

8.3. Frakční odlučivost cyklonu pro tři modelovací scale-up kritéria
 Experiment ověřil, že je možné používat matematický model pro návrh cyklonů, a proto byl tento model použit pro analýzu rozhodnutí o vhodnosti modelovacího kritéria.

Výpočet pro zmenšený cyklon byl proveden pro všechny tři kritéria vstupní rychlosti, respektive průtoku, a křivky odlučivosti byly zaneseny do jednoho grafu společně s křivkou pro průmyslový cyklon o průtoku $V_1 = 2100 \text{ m}^3/\text{h}$ (obr. 37).

Z grafu je patrné, že kritérium pro konstantní odstředivé zrychlení nejvíc koresponduje s křivkou pro cyklony průmyslového měřítka, a proto ho lze považovat za optimální modelovací kritérium pro scale-up (scale-down) návrhu hydrocyklonu (příloha (3)).

Pro první možnost kritéria konstantní vstupní rychlosti jsou zapotřebí velké průtoky a bylo by nutné použít výkonnější čerpadlo. Roste také tlaková ztráta, která by se musela promítnout do dimenzování konstrukce. Jelikož podle matematického modelu křivka odlučivosti neodpovídá křivce pro cyklony průmyslového měřítka, toto kritérium se experimentálně neověřovalo. V rámci experimentu jsme testovali pouze druhé a třetí kritérium, tj. konstantní Stokesovo číslo a konstantní odstředivé zrychlení.



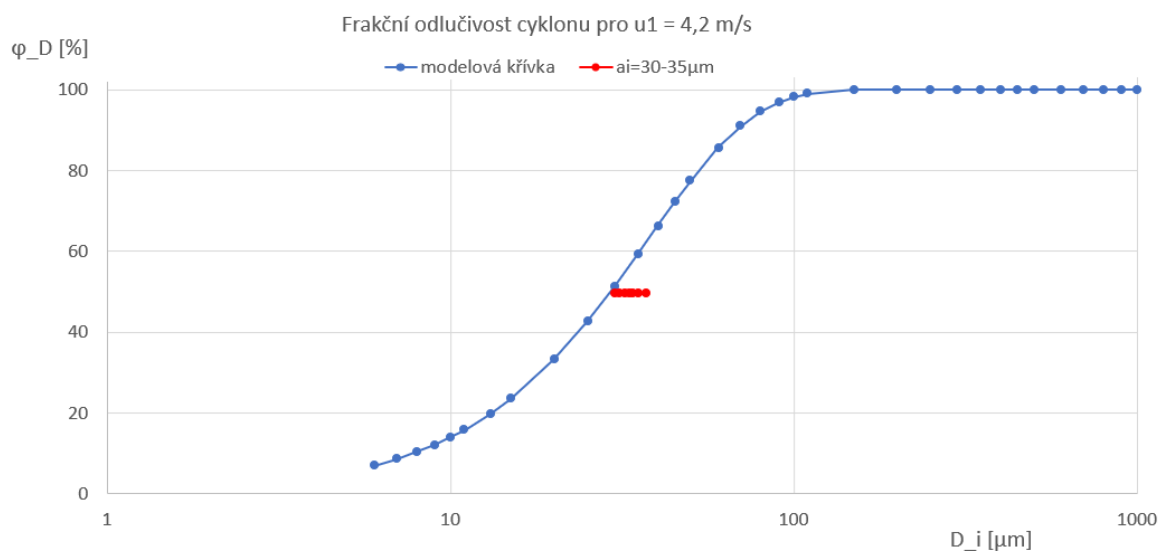
Obrázek 37: Frakční odlučivost cyklonu pro tři modelovací kritéria

8.4. Ověřovací pokus odlučivosti s balotinou

Posledním experimentem bylo ověření použitelnosti matematického i experimentálního modelu pro jemné frakce. Pro tento pokus byla použita skleněná balotina o hustotě $\rho_{\text{balotina}}=2600 \text{ kg/m}^3$ a pro tuto hodnotu byl vytvořen matematický model (příloha (6)).

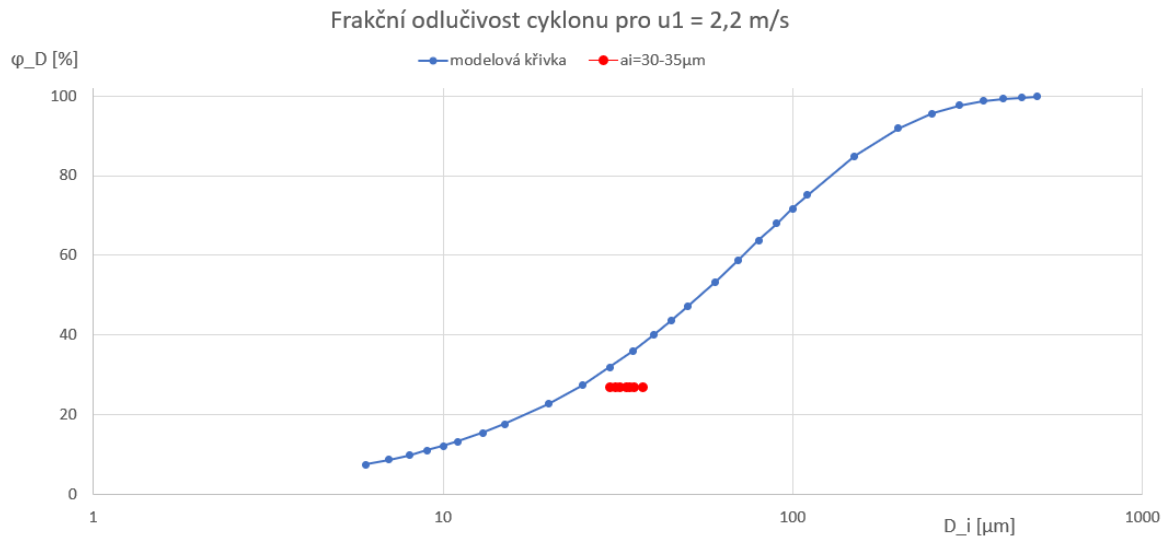
Do grafů odlučivosti z matematického modelu pro balotinu byly zaneseny hodnoty odlučivosti z experimentálního měření, pro kritérium konstantního odstředivého zrychlení (obr. 38) a konstantního Stokesova čísla (obr. 39).

Z grafů je patrné, že provedený experiment odpovídá matematickému modelu. V rámci experimentu pro konstantní odstředivé zrychlení se z 1kg vstupních částic odloučilo 495,1g částic a tato hodnota odpovídá velmi dobře výpočtovému modelu.



Obrázek 38: Frakční odlučivost cyklonu pro $u_1 = 4,2 \text{ m/s}$ s experimentálním ověřením pomocí balotiny

Při experimentu s konstantním Stokesovým číslem se z 1kg odloučilo 271g a tato hodnota také přibližně odpovídá matematickému modelu. Odchylka může být způsobena nešetrnou manipulací vzorku při průběhu experimentu a při sušení.



Obrázek 39: Frakční odlučivost cyklonu pro $u_1 = 2,2 \text{ m/s}$ s experimentálním ověřením pomocí balotiny

9. Závěr

V rámci práce byl vytvořen matematický model hydrocyklonu, který vychází z hydrodynamických podmínek a silových rovnováh působících na částice, a podle kterého byla stanovena citlivost parametrů cyklonu (vliv hustoty a průtoku) na vlastnosti použité suspenze. Výpočetní model se nachází v příloze lze použít k výpočtu tlakové ztráty a odlučivosti pro návrh hydrocyklonu.

Na základě geometrické podobnosti s průmyslovou aplikací byl podle výrobní dokumentace vyroben zmenšený laboratorní cyklon pro ověření správnosti výpočtového modelu. Byla provedena montáž a provozní zkoušky v laboratoři ústavu Procesní a zpracovatelské techniky FS ČVUT.

V rámci experimentu byla sledována tlaková ztráta, ze které se vypočítal ztrátový součinitel ζ_c . Z výsledků je vidět shoda mezi průmyslovou hodnotou ζ_c , hodnotou vypočtenou v rámci experimentu a hodnotou z matematického modelu. S určitou přesností lze říct, že pro tuto geometrii cyklonu je hodnota ztrátového součinitele v rozmezí $\zeta_c = 800 - 900$, při charakteristické rychlosti vztažené na válcovou část cyklonu.

Byla testována odlučivost při dvou různých průtocích, respektive při dvou vstupních rychlostech, které odpovídají dvěma modelovacím kritériím – konstantní odstředivé zrychlení a konstantní Stokesovo číslo. Z experimentu byly stanoveny hodnoty odlučivosti 99% pro konstantní odstředivé zrychlení a 90% pro kritérium konstantního Stokesova čísla.

Dále byl proveden ověřovací pokus s prakticky monodisperzní skleněnou balotinou, který potvrdil shodu vypočtené odlučivosti z matematického modelu s jeho experimentálním ověřením, a je tedy možné použít matematický model pro predikci odlučivosti.

Na základě výpočtového modelu a experimentálního ověření byla stanovena odlučivost cyklonu pro dvě kritéria metody scale down – kritérium konstantního odstředivého zrychlení a kritérium konstantního Stokesova čísla. S dostatečnou přesností lze na základě porovnání výpočtů pro průmyslový a laboratorní cyklon určit, že kritérium konstantního odstředivého zrychlení je vhodné modelovací kritérium pro návrh scale – down/ up cyklonů při zachování složení suspenze.

Celé laboratorní zařízení je konstrukce modulárního typu a je možné snadno modifikovat geometrii jednotlivých částí. V budoucnu je možné zařízení využít pro optimalizační proces geometrických parametrů při návrhu hydrocyklonu. Z výsledků je zřejmé, že pro optimalizaci je možné použít matematický model a experimentálně ověřit pouze vybrané geometrické konfigurace, což jednoduše umožňuje modulární koncepcí laboratorního zařízení.

10. Seznam symbolů

a_i	střední průměr zrna	[mm]
a_d	odstředivé zrychlení	[m/s ⁻²]
c_{vp}	objemová konc. pevné fáze v přepadajícím proudu	[-]
D_c	průměr válcové části cyklonu	[m]
D_i	průměr částic	[μ m]
d_k	průměr výstupního otvoru pro odloučené částice	[m]
d_p	průměr výstupního otvoru pro neodloučené částice	[m]
d_1	průměr vstupní trubky do cyklonu	[m]
D_{50}	rozměr částic s odlučivostí 50%	[m]
$e_z(u_c)$	ztráta cyklonu pro u_c	[J/kg]
$e_z(u_1)$	ztráta cyklonu pro u_c	[J/kg]
f	součinitel tření	[-]
f	frekvence	[Hz]
F_i	distribuční funkce podle hmotnosti	[%]
H_c	výška cyklonu	[m]
H_k	výška kuželové části	[m]
H_p	délka zanoření přepadové trubky do cyklonu	[m]
H_v	výška válcové části	[m]
H_0	teoretická délka víru	[m]
$k_{stř}$	střední drsnost vnitřního povrchu cyklonu	[mm]
$k_{\phi c}$	parametr v závislosti na kvalitě cyklonu	[-]
$k_{\phi t}$	parametr exponenciálního modelu frakční odlučivosti	[-]
k^*	relativní drsnost vnitřního povrchu cyklonu	[-]
Ly_{50}	Ljaščenkovo číslo	[-]
m	hmotnost	[kg]
m_{sik}	hmotnost zachycených zrn o frakčním rozměru D_i	[kg]
m_{sl}	hmotnost vstupujících částic	[kg]
n	exponent	[-]

n_ϕ	parametr exponenciálního modelu frakční odlučivosti	[-]
p	průběh tlaků v jádře cyklonu	[Pa]
$\Delta p_c(u_c)$	tlaková diference na cyklonu pro u_c	[Pa]
$\Delta p_c(u_{1c})$	tlaková diference na cyklonu pro u_{1c}	[Pa]
Δp_i	celková tlaková diference	[Pa]
p_p	tlak na okraji jádra	[Pa]
r	poloměr pro průběhy tlaků/rychlostí	[m]
Re_{50}	Reynoldsovo číslo	[-]
R_s	vzdálenost osy vstupního otvoru od osy válcové části cyklonu	[m]
S_{1c}	plocha vstupního obdélníkového kanálu	[m ²]
T	teplota	[°C]
u_{ap}	střední hodnota axiální rychlosti na výstupu z přepadové trubky	[m ² /s]
u_c	fiktivní rychlost ve válcové části cyklonu	[m/s]
$u_{ch}(D_c)$	charakteristická rychlost (D_c)	[m/s]
u_{rp}	střední hodnota radiální složky rychlosti	[m/s]
u_{1c}	střední rychlost ve vstupním kanále	[m/s]
u_ϕ	tangenciální rychlost v jádře cyklonu	[m/s]
$u_{\phi r}$	tangenciální rychlost na okraji jádra	[m/s]
V_k	objemový průtok na výstupu z hydrocyklonu (odloučené částice)	[m ³ /s]
V_p	objemový průtok na výstupu z hydrocyklonu (neodloučené částice)	[m ³ /s]
V_{1c}	objemový průtok na vstupu do hydrocyklonu	[m ³ /s]
ξ	koncentrace	[-]
$\alpha_{zvolená}$	empirický součinitel	[-]
$\rho_{kap/plyn}$	hustota kapaliny	[kg/m ³]
$\rho_{particles}$	hustota částic	[kg/m ³]
$\mu_{kap/vzd}$	dynamická viskozita	[Pa.s]
ζ_c	ztrátový součinitel cyklonu pro u_{ch}	[-]

$\zeta_{c_stř}$	střední hodnota ztrátového součinitele cyklonu pro u_{ch}	[-]
ζ_1	ztrátový součinitel cyklonu pro u_1	[-]
λ_l	součinitel hydraulického tření tekutiny	[-]
λ_s	ekvivalentní součinitel tření disperg. částic o stěnu cyklonu	[-]
η_h	účinnost hydrocyklonu	[-]
ϕ	celková odlučivost	[-]
ϕ_i	frakční odlučivost	[-]
$D_{50} \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho)u_1}{\mu D_c}}$	Stokesovo kritérium	[-]

11. Seznam obrázků

Obrázek 1: Zjednodušené proudění v cyklonu [1]	15
Obrázek 2: Schéma hydrocyklonu [1]	16
Obrázek 3: Ilustrační obrázek frakční odlučivosti	17
Obrázek 4: Vstupní hodnoty pro výpočet	19
Obrázek 5: Uspořádání výpočtů	19
Obrázek 6: Graf závislosti ztrátového součinitele cyklonu ζ_1 pro $Re > 105$..	21
Obrázek 7: Zobrazení výpočtových parametrů v matematickém modelu (excel)	22
Obrázek 8: Výpočet frakční odlučivosti a její znázornění v grafu	23
Obrázek 9: Porovnání frakčních odlučivostí cyklonu pro různé průtoky	24
Obrázek 10: Frakční odlučivost cyklonu pro různé hustoty.....	26
Obrázek 11: Basic design hydrocyklonu s hlavními rozměry	27
Obrázek 12: PID experimentu bez regulace	28
Obrázek 13: Výkres soustavy hydrocyklonu	31
Obrázek 14: Vrchní díl.....	33
Obrázek 15: Řez vrchního dílu, pohled na tangenciální vstup.....	34
Obrázek 16: Válcový díl.....	35
Obrázek 17: Kuželový díl.....	36
Obrázek 18: Nosná konstrukce.....	37
Obrázek 19: Fotografie z montáže laboratorního zařízení	38
Obrázek 20: Experimentální okruh (1).....	39
Obrázek 21: Experimentální okruh (2).....	40
Obrázek 22: Konečné PID schéma experimentu	42
Obrázek 23: Kalibrační křivka.....	43
Obrázek 24: IBC nádrž s neodloučenými částicemi	44
Obrázek 25: Vysušené odloučené částice koksů a příměsí z technologie	46

Obrázek 26: Vibrační stroj se sadou sít.....	47
Obrázek 27: Ukázka jemné frakce na sítu s oky 0,106 mm	48
Obrázek 28: Distribuční rozdělení částic podle hmotnosti pro $V_1=26$ m ³ /h	50
Obrázek 29: Integrální distribuční rozdělení částic podle hmotnosti pro $V_1=26$ m ³ /h	50
Obrázek 30: Distribuční rozdělení částic podle hmotnosti pro $V_1=50$ m ³ /h	51
Obrázek 31: Integrální distribuční rozdělení částic podle hmotnosti pro $V_1=50$ m ³ /h	51
Obrázek 32: Distribuční rozdělení částic podle hmotnosti pro vstupní směs částic	52
Obrázek 33: Integrální distribuční rozdělení částic podle hmotnosti pro vstupní směs částic	52
Obrázek 34: Integrální distribuční rozdělení částic podle hmotnosti pro neodloučené částice	53
Obrázek 35: Distribuce velikosti částic balotiny (viz příloha 8).....	54
Obrázek 36: Integrální distribuční křivka	58
Obrázek 37: Frakční odlučivost cyklonu pro tři modelovací kritéria	59
Obrázek 38: Frakční odlučivost cyklonu pro $u_1 = 4,2$ m/s s experimentálním ověřením pomocí balotiny.....	60
Obrázek 39: Frakční odlučivost cyklonu pro $u_1 = 2,2$ m/s s experimentálním ověřením pomocí balotiny.....	61

12. Seznam tabulek

Tabulka 1: Výpočet a porovnání hodnot ζ_c a tlakové ztráty (hodnoty z průmyslu, mat. model)	55
Tabulka 2: Výpočet a porovnání hodnot ζ_c a tlakové ztráty (hodnoty z experimentu, mat. model).....	56
Tabulka 3: Celková odlučivost hydrocyklonu s průmyslovou suspenzí.....	57

13. Literatura

[1] F. Rieger, V. Novák, T. Jirout.: Hydromechanické procesy II, Nakladatelství ČVUT, Praha 2007, ISBN 978-80-01-03302-9.

[2] ČSN 69 0010.

14. Seznam příloh

- 1) Posouzeni_soucasneho_stavu_(výpočet2_intecha_(kruhovy_vstup))
- 2) Posouzeni_hustoty_(výpočet2_intecha_(kruhovy_vstup))
- 3) Modelovaci_kriteria_(výpočet2_intecha_(kruhovy_vstup))
- 4) Modelovaci_kriteria_vyhodnoceni_(výpočet2_intecha_(kruhovy_vstup))
- 5) Zpracovani_experimentalnich_dat
- 6) Modelovaci_kriteria_balotina_vyhodnoceni_(výpočet2_intecha_(kruhovy_vstup))
- 7) Výkresová_dokumentace
- 8) Pevnostni_vypocet
- 9) Laser_neodloučené částice koksu
- 10) laser_balotina