



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

METODY PRO SEPARACI KAPALINY Z PLYNU

METHODS FOR LIQUID-GAS SEPARATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Matoušek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Mgr. Ing. Marek Vondra, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav procesního inženýrství
Student:	Bc. Jakub Matoušek
Studijní program:	Procesní inženýrství
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	Mgr. Ing. Marek Vondra, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Metody pro separaci kapaliny z plynu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Účinná separace kapalně a plynné fáze je jednou z typických operací chemického inženýrství. Uplatnění nalézá mimo jiné v odpařovacích jednotkách, které jsou využívány pro zahušťování široké palety kapalin a suspenzí, ať už se jedná o tekuté odpady nebo finální produkty zpracovatelských procesů. Jednou z nových aplikací odpařování jsou průmyslové odpadní vody. Při jejich tepelném zahušťování je účinná separace kapalně a plynné fáze nezbytná pro zajištění požadované kvality separované vody, která může být v provozu znovu využita. Diplomová práce by měla poskytnout základní přehled o problematice a představit a vyhodnotit dostupné metody pro separaci kapaliny z plynu v odpařkách. Práce by měla mimo jiné vycházet z experimentálně získaných dat a studií.

Cíle diplomové práce:

1. Metody pro separaci kapaliny z plynu – přehled a stručný popis používaných metod a technologií, princip, výhody a nevýhody
2. Volba konkrétní separační metody a její podrobnější popis
3. Experimentální ověření zvolené separační metody a porovnání výsledků s teoretickými předpoklady
4. Návrh úprav pro zvýšení účinnosti separace

Seznam doporučené literatury:

MINTON, Paul E. Handbook of evaporation technology. Park Ridge, N.J., U.S.A: Noyes Publications, 1986. ISBN 978-0-8155-1097-0.

PERRY, Robert H a Don W GREEN. Perry's chemical engineers' handbook. New York: McGraw-Hill, 2008. ISBN 978-0-07-142294-9.

MEDEK, J. Hydraulické pochody, VUT Brno, 2004.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato diplomová práce se věnuje oddělování kapaliny z plynu. V úvodní části jsou představeny funkční principy a metody pro separaci kapiček z proudu plynné fáze. Dále rešerše uvádí typy separátorů a výplňových odlučovačů kapek včetně jejich předností a nedostatků. V práci jsou detailně popsány cyklonové odlučovače z hlediska principu odlučování, konstrukčního provedení a faktorů ovlivňujících účinnost separace. Experimentální činnost probíhala na slané vodě a zabývala se nalezením optimálních provozních podmínek pro cyklon s danou geometrií za využití metody plánovaného experimentu (DOE). Do cyklonu vstupovala směs pára–kapalina generovaná v odparce a byl zkoumán vliv koncentrace soli a vstupního průtoku na odlučivost a tlakovou ztrátu cyklonu. Experimentálně bylo dosaženo nejvyšší účinnosti 97,22 % při průtoku 8,59 kg/h a se salinitou vody přiváděné do odparky 14 246 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Kvalita destilované vody tedy činila 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Bez zapojení cyklonu by vodivost zkondenzované páry odpovídala 175,31 $\mu\text{S}/\text{cm}$. V závěrečné části byl uveden návrh úprav testovaného zařízení pro zlepšení separační účinnosti v rámci technologie odparek.

Klíčová slova

Separace kapaliny z plynu, separátor plyn–kapalina, separátor pára–kapalina, odlučovač kapek, demister, odstředivý separátor, odmlžovací cyklon, cyklonový odlučovač, vakuová odparka, plánovaný experiment

Abstract

This diploma thesis is devoted to the separation of liquid from gas. Functional principles and methods for the separation of droplets from the gas phase stream are presented in the introductory part. The research also lists the types of separators and mist eliminators, including their advantages and disadvantages. Cyclone separators are described in detail in the thesis in terms of the separation principle, design and factors influencing the efficiency of separation. The experimental activity took place on salt water and dealt with finding the optimal operating conditions for a cyclone with a given geometry using the method of Design of experiments (DOE). The vapor-liquid mixture generated in the evaporator entered the cyclone and the effect of salt concentration and inlet flow rate on the separation efficiency and pressure drop of the cyclone was investigated. Experimentally, the highest efficiency of 97.22% was achieved at a flow rate of 8.59 kg/h and with a salinity of water supplied to the evaporator of 14,246 $\mu\text{S}/\text{cm}$. The quality of the distilled water was therefore 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Without the inclusion of a cyclone, the conductivity of the condensed steam would correspond to 175.31 $\mu\text{S}/\text{cm}$. In the final part, a proposal for modifications of the tested equipment was presented to improve the separation efficiency within the evaporator technology.

Key words

Separation of liquid from gas, gas–liquid separator, vapor–liquid separator, mist eliminator, demister, centrifugal separator, cyclonic demister, cyclone separator, vacuum evaporator, Design of Experiment

Bibliografická citace

MATOUŠEK, Jakub. *Metody pro separaci kapaliny z plynu* [online]. Brno, 2023. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/148879>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Marek Vondra.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod odborným vedením Mgr. Ing. Marka Vondry, Ph.D. a použil jsem pouze podklady uvedené v seznamu citované literatury.

V Brně dne 26. 5. 2023

Podpis.....

Poděkování

Děkuji Mgr. Ing. Marku Vondrovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, čas, cenné připomínky a rady při zpracování této diplomové práce.

Obsah

1	Úvod	7
2	Separace kapaliny z plynu	9
2.1	Vznik a velikost kapek	9
2.2	Separáční principy	11
2.2.1	Princip setrvačných sil	11
2.2.2	Princip gravitačních sil	11
2.2.3	Princip filtrace.....	11
2.3	Funkční sekce gravitačních separátorů	11
2.3.1	Vstupní aparát	12
2.3.2	Sekce gravitačního usazování	12
2.3.3	Sekce akumulace kapaliny	12
2.3.4	Výplňov� odlučovač kapek	12
2.4	Gravitační separátory	12
2.4.1	Vertikální	13
2.4.2	Horizontální	14
2.4.3	Sférické	15
2.5	Filtrační separátory	16
2.6	Odstřediv� separátory	17
2.7	Klasifikace výplňov� odlučovačů kapek	18
2.7.1	Drátěné.....	19
2.7.2	Vláknové.....	20
2.7.3	Lamelové	21
2.7.4	Cyklonové.....	22
2.7.5	Kombinované.....	23
2.7.6	Membránové	24
3	Cyklonov� odlučovač	25
3.1	Princip odloučení kapek z nosného plynu	25
3.2	Přednosti a nedostatky	27
3.3	Komparace s cyklony plyn–pevná látka	27
3.4	Klasifikace dle konstrukce	28
3.4.1	Cyklony s reverzním tokem	28
3.4.2	Cyklony s axiálním tokem	30
3.5	Opětovné strhávání kapaliny.....	31
3.6	Vzor proudění	33

3.7	Vliv geometrie na výkon cyklonu.....	36
3.8	Výkon cyklonu.....	41
3.8.1	Teorie tlakové ztráty	41
3.8.2	Výpočet tlakové ztráty	44
3.8.3	Účinnost separace	46
3.9	Základní geometrie	49
4	Experimentální ověření testovacího cyklonu.....	50
4.1	Geometrie testovacího cyklonu.....	50
4.2	Popis procesu s testovacím zařízením.....	51
4.2.1	Popis procesu a experimentální aparatury	51
4.2.2	Měřicí výbava	53
4.2.3	Stanovení průtoku a rychlosti páry	53
4.3	Stanovení kvality vody	54
4.4	Plánovaný experiment – DOE	56
4.4.1	Centrálně kompozitní návrh.....	57
4.5	Návrh experimentu.....	58
4.5.1	Výpočet účinnosti	60
4.6	Průběh experimentu	60
4.7	Ověření modelů tlakové ztráty	63
4.8	Analýza DOE	64
4.8.1	Tlakové ztráty	65
4.8.2	Odlučivost kapek	68
5	Návrh úprav pro zvýšení účinnosti odmlžování	72
6	Závěr	73
	Seznam použité literatury	74
	Seznam použitých zkratk	81
	Seznam použitých symbolů	81
	Seznam obrázků.....	83
	Seznam grafů	84
	Seznam tabulek	84
	Seznam příloh	85

1 Úvod

Technologie vakuového odpařování jsou efektivním a konkurenceschopným řešením pro nakládání s odpadními vodami a jejich znovuvyužitím. Touto metodou lze čistit a významně redukovat množství kapalného odpadu v různých oblastech průmyslové činnosti. Vakuum vyvíjené v odparce snižuje bod varu vody, což umožňuje zařízení pracovat za nižších provozních teplot. Voda extrahována z odpadních toků se nazývá destilovaná voda neboli destilát, jenž lze opětovně využít v závodě pro různé aplikace včetně různých výrobních procesů a chlazení. Tím se významně tedy minimalizuje spotřeba pitné vody, náklady spojené s likvidací odpadu a skladování velkého objemu nebezpečného odpadu v průmyslových areálech. Dále přispívá ke snížení emisí skleníkových plynů, jenž jsou produkovány při přepravě zahuštěného odpadu [1].

Odpařovací jednotky se ukázaly jako účinné v mnoha aplikacích průmyslového čištění odpadních vod včetně kapalných odpadů z elektráren, chemických závodů a z povrchových úprav kovů. Běžně se také používají při zpracování odpadních celulósových louhů, proudů emulgovaného oleje, toků s vysokým obsahem rozpuštěného cukru a netěkavých vodných organických nebo anorganických toků obsahujících různá barviva, kyseliny a zásady [2].

Nejvýznamnější výhodou odparek oproti konvenčním fyzikálně-chemickým procesům je vysoká kvalita destilované vody, kdy celkový obsah rozpuštěných pevných látek v destilátu běžně nepřesahuje 10 mg/l, dokonce v některých případech nabývá hodnot pod 2 mg/l. Voda produkovaná odparkou tak splňuje specifikace pro vypouštění odpadních vod a lze ji téměř vždy recyklovat k opětovnému použití [2].

Průmyslové vakuové odparky jsou tedy klíčovou technologií pro implementaci do procesu Zero Liquid Discharge, kdy se odpadní voda přeměňuje na dva toky. Prvním je recyklovatelná voda vysoké kvality, jež může tvořit až 98 % původní kapalné složky odpadu, a koncentrovaný pevný odpad obsahující znovu využitelné cenné suroviny a vedlejší produkty rozpuštěné ve vodě [1].

Během procesu odpařování však dochází ke stržení kapaliny v podobě kapiček proudem brýdových par. Strhávání způsobuje zejména kolaps kapalného filmu, který obklopuje vyvíjené bubliny plynné fáze, čímž dochází ke vzniku a rozptylu velmi malých kapiček do proudu páry. Mezi další mechanismy strhávání se řadí atomizace na povrchu kapaliny způsobená prouděním plynu o vysoké rychlosti a operace zahrnující rozprašování kapaliny do proudu plynné fáze. Posledním mechanismem je uvolňování kapaliny do plynu v operacích, kde dochází k jejich přímému kontaktu [3]. Strhávání může ohrozit bezpečnost závodu a způsobit kontaminaci par, které následně mohou zapříčinit snížení kvality destilátu a účinnosti souvisejících separačních procesů typu destilace a absorpce. V závislosti na typu odpařovací technologie a provozních parametrech se velikost kapalného úletu může pohybovat v rozsahu několika set mikrometrů až 30 μm a menší [4]. Rychlost toku generované páry v odparce zabraňuje oddělení kapalného úletu vlivem gravitační síly a tedy jeho odvedení společně s koncentrátem. Kapičky stržené a unášené párou lze odloučit za použití separátorů plyn–kapalina a výplňových odlučovačů kapek [3].

Předmětem úvodní rešerše této diplomové práce je poskytnout stručný přehled metod a principů pro separaci kapalné složky z proudu plynu a představit charakteristiky

separačních technologií. Ve druhé části rešerše bude pozornost zaměřena na detailní popis odmlžování za využití cyklonového separátoru. Praktická část se bude zabývat identifikací optimálních provozních podmínek cyklonu s danou geometrií, jenž bude zapojen do systému s odparkou. Test bude probíhat na slané vodě a bude realizován prostřednictvím metody plánovaného experimentu (Design of Experiment - DOE). Získaná data budou analyzována a porovnána s teoretickými předpoklady. Na základě výsledků měření a rešerše bude navržen upgrade testovaného cyklonu za účelem zvýšení účinnosti eliminace kapalného úletu z plynné fáze. Tato diplomová práce vychází zejména ze zahraniční odborné literatury a experimentálně získaných dat v rámci Laboratoře energeticky náročných procesů v NETME Centru při Fakultě strojího inženýrství VUT v Brně.

2 Separace kapaliny z plynu

Existuje celá řada aplikací v chemickém a zpracovatelském průmyslu, kde proudy plynů a par zastávají velmi důležitou roli k zajištění správné funkčnosti procesu jako celku. Určité podprocesy mohou vyžadovat, aby se tyto proudy záměrně vytvořily, čistily a separovaly. Plyny se kapalinou obohacují mechanicky (tlakem, tryskáním) nebo tepelným vznikem kapiček (absorpční kolony a pračky plynů) a fyzikálně chemickými reakcemi (kondenzace). V některých procesech může být vyžadováno, aby se následně oddělila stržená kapalina od procesního plynu [5].

Výskyt kapiček v proudech procesního plynu má za následek snížení účinnosti daných procesů a případně mohou i poškozovat zařízení, která se s tímto plynem dostávají do kontaktu [6]. Poškození vybavení daného systému může vzniknout jako důsledek koroze nebo eroze nebo jako důsledek usazování, spékání a kontaminace produktu [5]. Může také způsobovat vysokou nepřesnost přístrojů při měření plynů. Oddělení dispergované kapaliny od plynného prostředí je zásadní i pro dodržení limitů na nečistoty, jež jsou stanoveny požadavky daných produktů [7]. Dále plyny musí být zbaveny kapalného úletu před uvolněním do atmosféry, aby byly dodrženy předpisy a nedocházelo ke kontaminaci životního prostředí [8].

Separace kapaliny od plynu nastane v průběhu času přirozeně, avšak rychlost, s jakou k této separaci dochází, je pomalá a z ekonomického hlediska často netolerovatelná. Proto se k urychlení oddělení látek používají různé separační procesy [8].

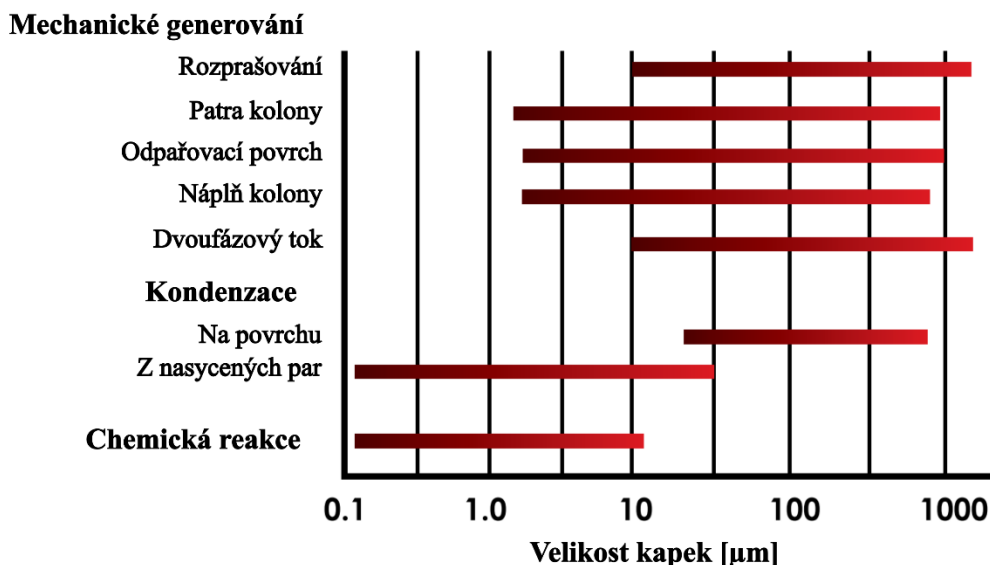
Množství přítomné kapaliny, rozměr stržených kapek a kvalita výstupního produktu definují, jaký systém bude aplikován pro separaci kapalně fáze z plynu [5]. Velikost kapiček se může pohybovat například v rozmezí 100–500 mikronů, obvykle ale dosahují menších rozměrů [6].

Cílem této kapitoly je poskytnout přehled a funkční princip používaných metod a technologií pro separaci kapalně fáze z proudu plynu, včetně jejich předností a nedostatků.

2.1 Vznik a velikost kapek

V procesech, kde se plyn dostává do kontaktu s kapalinou, proud plynu strhává určité množství kapaliny ve formě kapiček. Mechanismy způsobující tvorbu kapek, jež mají být separovány, definují jejich velikost. Znalost těchto mechanismů a velikosti kapiček je důležitá z hlediska správného výběru a návrhu odlučovače kapek [9].

Mezi základní mechanismy zodpovědné za vznik kapiček se řadí mechanické generování, kondenzace a chemická reakce. Distribuce velikosti kapek v závislosti na daném mechanismu prezentuje obr. 1 [9].



obr. 1: Velikost kapek způsobená různými mechanismy, upraveno [9]

- **Mechanické generování** – běžně se velikost průměru kapek pohybuje relativně v rozsahu 5-10 µm a větší, avšak vroucí či bublající povrch kapaliny může generovat i kapičky o průměru jen několik mikrometrů [9]. Mikrokapičky se mechanicky vytvářejí při působení smykových sil, které mohou rozbít či atomizovat kapalinu. Kapičky takto vznikají například v sušicích a absorpčních kolonách při výrobě kyseliny sírové. V procesu dochází k rozstříku a bočnímu pohybu kapalně kyseliny přes náplň kolony a ve vstupním distributoru. Vzestupný proud plynu pak strhává kapky kyseliny, které mohou způsobit korozi zařízení a kontaminaci ovzduší. Proto je snaha tyto kapky eliminovat [10].
- **Kondenzace** – kapky strhávané z povrchu trubek tepelných výměníků zpravidla dosahují průměru nad 50 µm [9]. Při ochlazování proudu plynu nasyceného párou dochází k přímé kondenzaci kapaliny v parní fázi. V důsledku kondenzace páry obvykle vznikají kapičky o submikronové velikosti či průměru menším než 1 µm. V procesech na zpracování plastů, vytvrzování vinylu, úpravu tkanin a při obrábění kovů jsou tvořeny organické submikronové mlhy (tzv. modrý kouř). Tato mlha má za následek neprůhlednost pracovního prostředí a může způsobit zdravotní a bezpečnostní problémy [10].
- **Chemická reakce** – velké množství submikronových kapiček je tvořeno při chemické reakci dvou nebo více plynů za vzniku kapalného produktu. Aerosolové částice vznikají například při tavení kovů a koksování. Také v rafinérském provozu při čištění odpadního plynu ze spaloven za použití žíravin vznikají malé kapičky. Submikronová mlha kyseliny sírové dokonce vzniká při reakci stopového množství oxidu sírového s vodní párou. Tyto mlhy mohou znečistit ovzduší a způsobit nízkou viditelnost prostředí. Přítomnost kapiček v chemických procesech může ovlivnit kvalitu produktů a způsobit zanášení katalyzátoru a korozi. Tím se navyšují náklady na provoz a údržbu procesního zařízení [10].

Velikost mikroskopických kapiček dispergovaných v plynu lze obecně rozlišovat následovně [11]:

- **Sprej** – kapičky větší než 10 μm
- **Mlha a aerosoly** – kapky menší než 10 μm

Velikost kapiček ovlivňují také fyzikální vlastnosti kapaliny. Nízké povrchové napětí umožňuje vznik menších kapiček, zatímco vysoká viskozita podporuje tvorbu větších kapek. Rozptýlené kapičky v proudu plynu dosahují obecně různých velikostí [11].

2.2 Separační principy

Dosažení fyzické separace kapaliny z plynu je založeno na třech principech, jedná se o setrvačné síly, gravitační usazování a filtraci. Každý separátor využívá jeden z těchto principů, ale může jich kombinovat i více dohromady. Mechanické separátory lze aplikovat jen na nemísitelné fáze a/nebo na fáze s odlišnými hustotami. Níže jsou popsány jednotlivé mechanismy separace [12].

2.2.1 Princip setrvačných sil

Kapalina a plyn mají rozdílnou hustotu, což zapříčiňuje i různou setrvačnost jednotlivých fází. Větší kapky úletu nejsou schopné se rychle přizpůsobit náhlým změnám ve směru proudění plynu v blízkosti cíleného povrchu. Tedy zatímco plyn změni směr a pokračuje mezerami eliminátoru na výstup, kapky se odchýlí od proudnice plynu a sledují svojí původní dráhu díky své setrvačnosti. Výsledkem je náraz odchýlené kapky o cílený povrch odlučovače [6].

2.2.2 Princip gravitačních sil

Jelikož separace se uskutečňuje vlivem gravitace, oddělení tekutin závisí na rozdílné hustotě či hmotnosti jednotlivých fází. Stržené kapky se budou usazovat účinkem zemské přitažlivosti a tím samovolně oddělovat od plynu, ale pouze pokud nastane situace, kdy gravitační síla působící na dispergované kapky bude větší než unášecí (odporová) síla plynu proudícího kolem této kapky. Síla odporu vyplývá z rychlosti plynu a má tendenci pohybovat kapkou ve směru toku plynné fáze [12].

2.2.3 Princip filtrace

Filtrace je obvykle založena na průchodu dvoufázového proudu plyn–kapalina dvěma sekcemi. První část obsahuje koalescenční prvky, na jejichž povrchu ulpívají kapičky. V důsledku koalescence zvětšují kapky svůj objem. Při dosažení vhodné velikosti vytékají z filtračních elementů do centrálního jádra působením proudu plynu. Následně jsou kapky unášeny do druhé sekce s odlučovačem kapek, kde se odseparují [13].

2.3 Funkční sekce gravitačních separátorů

Gravitační separátory bez ohledu na velikost a tvar se skládají ze čtyř základních sekcí, jež jsou využity k oddělení kapalného úletu z proudu plynu. Jedná se o vstupní aparát, sekci gravitačního usazování, sekci akumulace kapaliny a odlučovač kapek [12].

2.3.1 Vstupní aparát

Tento aparát se dostává do kontaktu s plynem jako první. Umisťuje se na vstup do separátoru a aplikuje se za účelem absorbování hybnosti vstupního toku, čímž dojde ke snížení jeho rychlosti. Dále způsobí počáteční hrubou separaci stržených kapek z plynné fáze prudkou změnou směru proudění a nárazem vychýlených větších kapiček o stěnu aparátu. Nakonec způsobí rovnoměrnou distribuci toku plynu separátorem [12].

2.3.2 Sekce gravitačního usazování

V sekci gravitačního usazování jsou kapičky kapaliny z disperzního prostředí eliminovány působením gravitační síly. Plyn zde proudí relativně nízkou rychlostí a téměř bez turbulencí, což usnadňuje oddělení kapek. V některých horizontálních separátorech lze turbulence ještě snížit přidáním přímočarých lopatek, které fungují jako koalescery kapek. Tím se minimalizuje i potřebná horizontální délka separátoru pro eliminaci kapalného úletu [12]. Tento úsek je dimenzován na odstranění kapek o velikosti větší než 100–140 μm , které by jinak mohly způsobit přetížení odlučovače na konci separátoru [7].

2.3.3 Sekce akumulace kapaliny

Sekce na sběr kapaliny je navržena pro nahromadění veškeré kapalné fáze z proudu plynu, která se odseparovala ve vstupním aparátu, gravitační sekci a odlučovači kapek. Tato sekce také poskytuje u dvofázové separace dobu zdržení potřebnou pro odplynění kapaliny. U třífázových separačních procesech retenční doba, kromě již zmíněného odplynění, umožňuje oddělení vodních kapiček od lehčí kapalné fáze a naopak [12].

2.3.4 Výplňový odlučovač kapek

Část separátoru s koalescenčními prvky s velkým množstvím povrchových ploch sloužící ke slučování a eliminaci kapiček se nazývá odlučovač kapek neboli demister [14]. Při proudění plynu skrze odlučovač dochází k zachycení kapiček na cíleném povrchu odlučovače a malé kapičky se zde shlukují a formují do větších kapek nebo kapalných filmů. Následně se kapky uvolní vlivem gravitační síly a padají do záchytné nádrže na kapalinu [12]. Těmto odlučovačům kapek bude věnována větší pozornost v samostatné podkapitole 2.7.

2.4 Gravitační separátory

Gravitační separátory lze dle konfigurace nádoby obecně rozdělit na horizontální, vertikální a sférické [12]. Zejména gravitační síla zde řídí odlučování kapek z plynu [15]. Využívají se k rozdělení proudu smíšené fáze na samostatnou plynnou a kapalnou frakci, kterou je možné následně zpracovat či zlikvidovat. Vnitřní prostor nádoby se udržuje na předepsané hodnotě separačního tlaku a teplotě [7]. S klesající rychlostí proudění vícefázového proudu se zvyšuje účinnost separace. Pro usazování kapek účinkem gravitace jsou zapotřebí větší rozměry nádob, proto se separátory jen zřídka navrhují k eliminaci kapiček menších než 250 μm [15]. V dnešní době se běžně používají gravitační separátory plyn–kapalina v ropném, plynárenském a petrochemickém průmyslu [12].

Dle funkce se rozlišují na [15]:

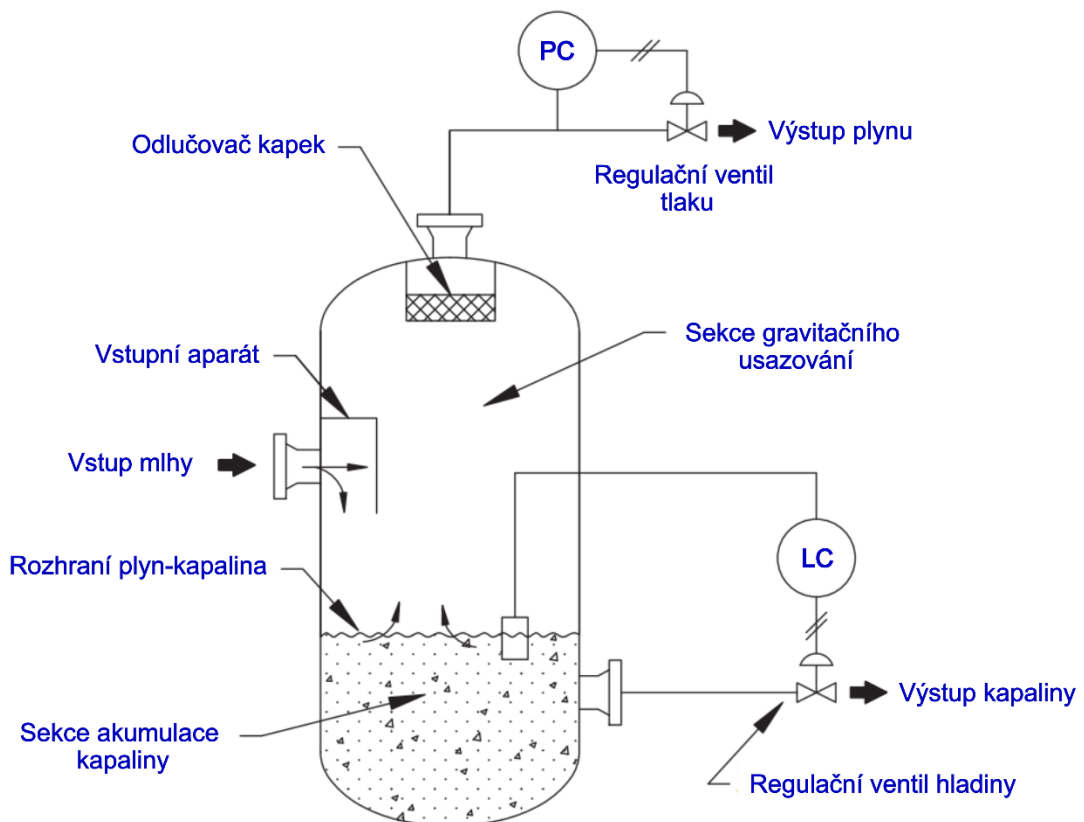
- **Dvoufázové** - oddělení plynu a kapaliny
- **Třífázové** - separace plynu, vody a oleje

Dle tlaku mohou být dále separátory kategorizovány na [15]:

- **Nízkotlaké** 0,07-1,24 MPa
- **Středotlaké** 1,58-4,83 MPa
- **Vysokotlaké** 6,72-10,34 MPa

2.4.1 Vertikální

Při vysokém poměru plyn/kapalina či nízkém celkovém množství plynné fáze je obvykle vhodné zvolit vertikální separátor. Dále jsou preferovány v případech, kdy na vstupu dochází k opětovné fluktuaci kapaliny nebo kdy by se mělo zabránit častému odpařování či by mohlo nastat opětovné smíchání kapaliny s plynem [12]. Popis vertikálního separátoru lze vidět na obr. 2 [7]



obr. 2: Vertikální separátor, upraveno [7]

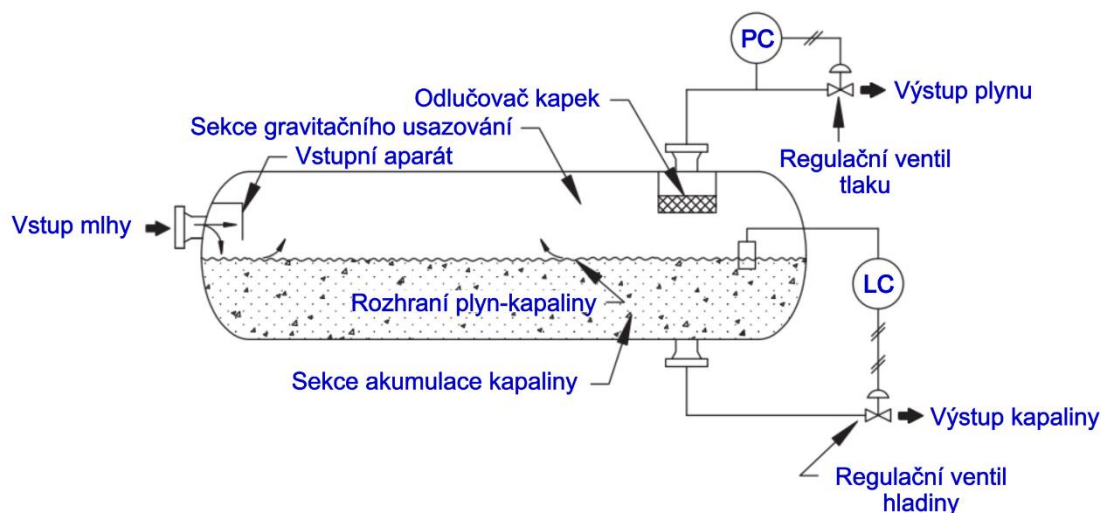
Tekutiny vstupují do separátoru potrubím směrem k vstupnímu aparátu, jehož hlavním úkolem je dosáhnout hrubé separace kapek z plynu. Současně zlepšuje distribuci dvoufázového toku napříč separátorem. Oddělené kapky od proudu plynu vstupním aparátem stékají směrem dolů do sběrné části na kapalinu. Plyn následně proudí vzhůru

do části gravitačního usazování, kde dochází k sekundárnímu odloučení kapek. Částice zde padají směrem dolů protiproudě k procesnímu plynu, jenž stoupá vzhůru. Velikost rychlosti usazování a průměr dané kapky kapaliny jsou si přímo úměrné. Malé kapky, jež nepřekojí unášející sílu proudu plynu, budou unášeny nahoru k odlučovači kapek. Zachycená kapalina na povrchu odlučovače se shlukuje do větších kapiček, které pak odkapávají dolů skrze plyn do sekce akumulace kapaliny na dně separátoru. Kapalná fáze proudí k hrdlu umístěného v dolní části separátoru a vypouštěcím ventilem je odváděna z nádoby ven. Tento ventil se reguluje pomocí regulátoru hladiny, jenž snímá hladinu a dle její výšky řídí vypouštěcí ventil. V okamžiku, kdy kapalina dosáhne rovnováhy, plynové bubliny proudí v protisměru odtékající kapaliny a přecházejí do prostoru s plynem. Vyčištěný plyn stoupá k výstupnímu hrdlu na plyn. Pomocí regulátoru tlaku umístěného na výstupu je v separátoru udržován požadovaný tlak [7]. U vertikálních separátorů se typicky poměr délky k průměru běžně pohybuje v rozsahu 2–4 [13].

Vertikální separátory si lépe poradí se zanášením, kontrola hladiny zde není tak kritická a instalační plocha je malá v porovnání s horizontálními jednotkami. Pro danou kapacitu plynu vyžaduje větší průměr a na horní straně nádoby se nachází nástroje a bezpečnostní zařízení, které jsou obtížně dosažitelné a obsluhovatelné [15].

2.4.2 Horizontální

Tento typ separátoru je vhodné aplikovat v případech, kdy je společně s plynnou fází přítomné velké množství kapaliny a rozpuštěných plynů. Také se používají při malém poměru plyn/kapalina nebo třífázových separačních aplikacích [12]. Funkci horizontálního separátoru ukazuje obr. 3 [7].



obr. 3: Horizontální separátor, upraveno [7]

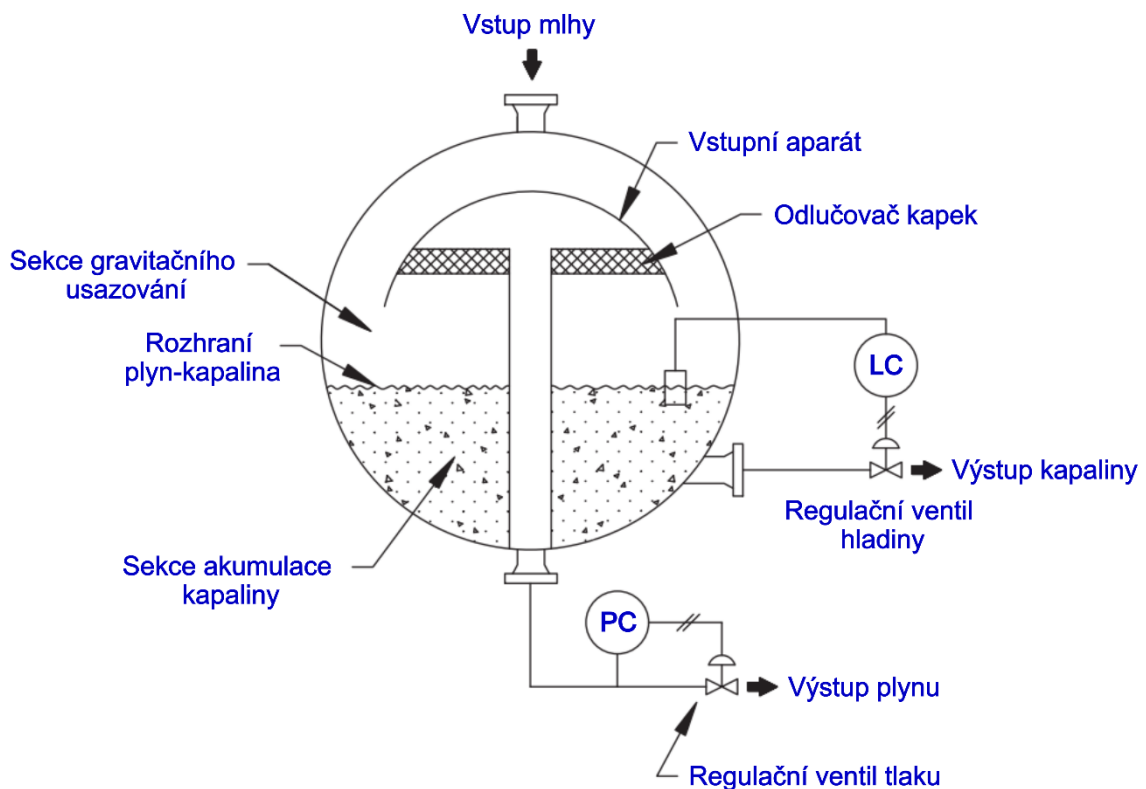
Plyn vniká do separátoru z připojeného potrubí směrem k vstupnímu aparátu, ten prudce změni směr proudění, čímž nastane hrubá separace kapek z plynu. Následně proudí do sekce gravitačního usazování nad kapalinou a kapky, jež nebyly odděleny vstupním aparátem a jsou schopné překonat unášecí sílu plynu, padají směrem dolů a shromažďují se na dně nádoby. Kapičky malých rozměrů, které nelze separovat v gravitační sekci, jsou

unášeny do odlučovače kapek situovaným před výstupním hrdlem na plyn. Odlučovač má velké množství povrchových ploch pro zachycení a koalescenci kapiček. Kapalina odtud stéká do zásobníku na dně separátoru a vyčištěný plyn je odsáván výstupním hrdlem. Sekce akumulace kapaliny poskytuje retenční čas pro uvolnění plynových bublinek přítomných v kapalině a dosažení stavu rovnováhy. Kapalná fáze je odváděna ze separátoru výstupním hrdlem situovaným ve spodní části nádoby. Tlak a hladina kapaliny v separátoru se udržuje stejným způsobem jako u horizontálního separátoru [7].

Horizontální separátory v porovnání s vertikálními separátory pro daný průtok tekutiny se vyrábí menší, a tudíž jsou i méně nákladné. Poměr délka/průměr horizontálního separátoru se typicky nachází v rozsahu 2,5–5 [13]. Horizontální separátory vyžadují menší průměr pro podobnou kapacitu v porovnání s vertikálními jednotkami. Nevzniká zde žádný protiproud, respektive odvodňování odlučovače kapek není bráněno proudem plynu. Rozptýlení pěny po velkém povrchu kapalné fáze obecně snižuje turbulence proudícího plynu. Jsou náročnější na čištění usazených nečistot [15].

2.4.3 Sférické

Separátory tohoto typu jsou vhodné pro vysokotlaké provozy vyžadující kompaktní velikost a malé objemy kapalin [12]. Jedná se o speciální případ vertikálního separátoru, kterému byl odebrán válcový plášť [7]. Princip separátoru vyobrazuje obr. 4 níže [7].



obr. 4: Sférický separátor, upraveno [7]

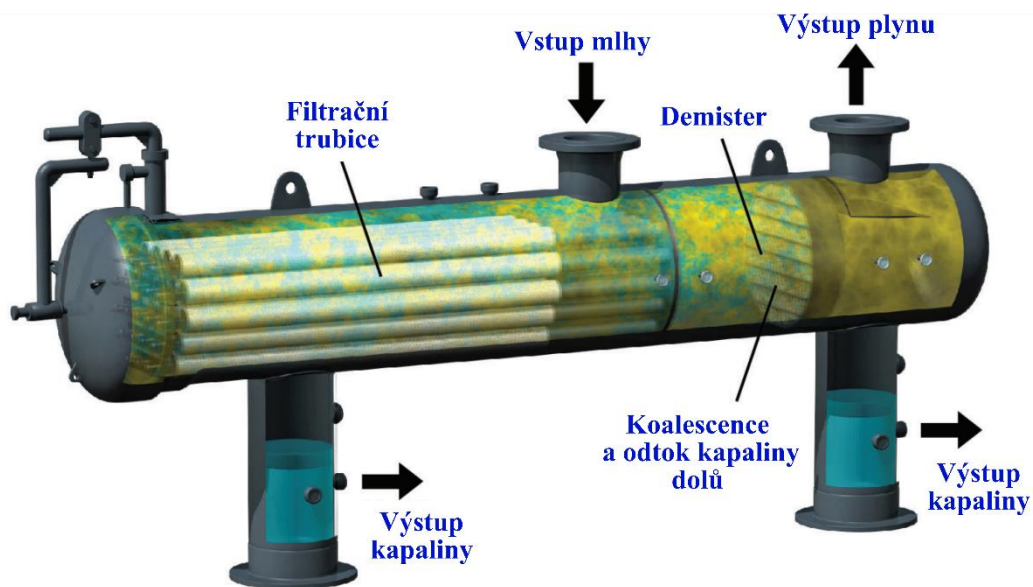
Plyn vniká skrze vstupní aparát rozdělující tok na dva samostatné proudy. Těsně pod rozhraním plyn-kapalina se nachází ve vodorovné poloze deska s otvory, skrze kterou kapky odloučené od plynu padají do zásobníku na kapalinu. Tenký film kapaliny

pokrývající desku usnadňuje odloučení a vzestup stržených plynů do sekce gravitačního usazování, kde se separují vlivem gravitace větší kapky. Následně plyn se zbylými kapičkami stoupá k odlučovači kapek, kde proběhne konečná separace kapalně fáze. Plyn výstupním hrdlem umístěným ve spodní části separátoru opouští pracovní prostor. Shromážděná kapalina odtéká přes vypouštěcí ventil, který udržuje optimální výšku hladiny a je připojen k plováku snímající polohu hladiny. Prostřednictvím zpětného regulačního ventilu se udržuje tlak v separátoru [7].

Sférické separátory nabízí nižší cenu, snadnou obsluhu a kompaktnost. Jsou vhodné i pro aplikace s vyšším zatížením kapaliny. Ale při nízkém poměru plyn/kapalina se dosahuje nižší účinnosti separátoru, proto nejsou dnes již tolik využívány [16]. Účinnost je nižší v porovnání s vertikálním i horizontálním separátorem [17].

2.5 Filtrační separátory

Filtrační separátory se často používají v procesech, kde se nachází vysoké průtoky plynu či nízké průtoky kapaliny. Dle konfigurace se dělí na horizontální a vertikální. Tento typ separátoru je určen k odloučení kapalných a pevných částic unášených v plynu. Naleznou uplatnění v aplikacích, ve kterých konvenční separátory jsou neúčinné [13]. Vyšší účinnosti dosahují i v porovnání s odstředivými jednotkami [12]. Na obr. 5 je představen a popsán filtrační separátor [18].



obr. 5: Filtrační separátor, upraveno [18]

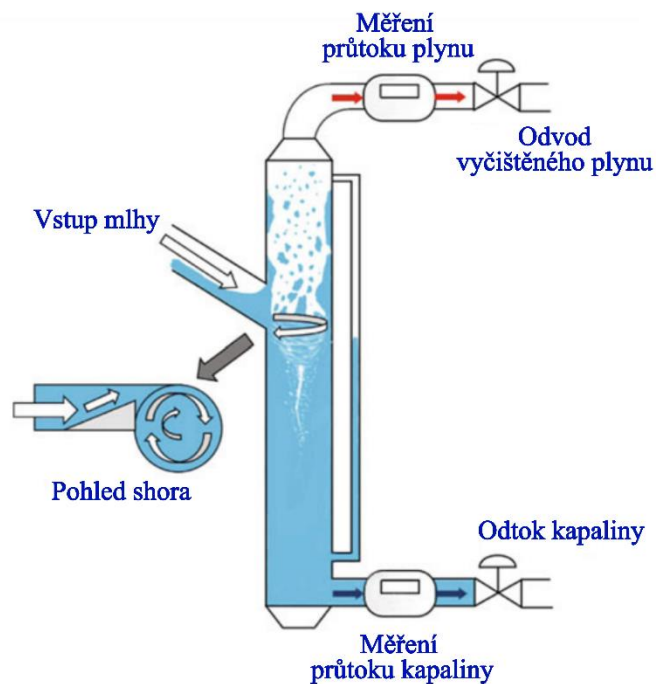
Dvoufázová směs vstupuje do separátoru skrze vstupní trysku k první sekci obsahující filtrační trubice, kterými prochází plyn. Dochází zde ke koalescenci kapalných částic do větších kapek. Tyto sloučené kapičky kapaliny projdou trubicí a jsou unášeny do sekundární části separátoru s odlučovačem kapek umístěným v blízkosti výstupu plynu. Cílem této sekce je eliminovat spojené kapky z proudu plynu. Zadržovaná kapalná fáze se shromažďuje v kapalinové jímce, odtud výstupním hrdlem opouští jednotku [19].

Dané typy koalescenčních prvků mohou eliminovat až 100 % kapek o průměru 1 mikron a 99 % kapek o rozměru 0,5 mikronu za předpokladu provozu jednotky při jmenovité

kapacitě a pravidelných výměn filtrů [13]. Filtrační část se skládá běžně z trubicového filtračního bloku ze skleněných vláken, jenž je nejúčinnější a má schopnost eliminovat submikronové kapičky [19]. Filtrační element je složen z perforovaného kovového válce, jenž má utěsněné konce pro kompresní těsnění. Druhý skelný válec o typickém průměru 12,7 mm obklopuje perforovanou trubku z kovu. Směr proudění tekutiny je od vnějšího sklolaminátového válce ke středu perforovaného kovového válce [13].

2.6 Odstředivé separátory

V odstředivých separátorech nebo cyklonech se kapky odstraňují působením a zvýšením odstředivé síly. Odstředivá síla v porovnání s gravitační silou zde může být několikanásobně vyšší. Nabývá u jednotek velkých průměrů 5krát a u malých vysokotlakých separátorů až 2500krát vyšších hodnot [7]. Obecně se tento typ separátoru využívá pro eliminaci kapiček o velikosti nad 100 μm , avšak vhodně navržený separátor má schopnost odloučit i kapičky o průměru 10 μm . Odstředivé separátory jsou velmi účinné pro odstranění velkého množství částic obsažených v proudu plynu [15]. Níže obr. 6 prezentuje základní schéma a princip válcového odstředivého separátoru [20].



obr. 6: Válcový odstředivý separátor, upraveno [20]

Obecně se v separátoru nachází během operace dva víry. První vír vzniká, když směs plyn–kapalina vstupuje tangenciálně do separátoru a proudí podél stěny dolů po spirálovité trajektorii. Působením odstředivé síly jsou přítomné kapky urychlovány a tlačeny ke stěně, kde při nárazu ztrácí svoji kinetickou energii a formují tenký stékající film až na dno jednotky. Odtud je následně kapalná fáze vypouštěna ze separátoru. Druhý vír, jenž stoupá spirálovitě vzhůru k výstupnímu bodu separátoru, je tvořen vyčištěným plynem v centrální části jednotky [7].

Odstředivé separátory mají nižší hmotnost a kompaktní rozměry. Dále vyžadují jen malou údržbu a plochu pro instalaci, která je snadná stejně jako obsluha této jednotky.

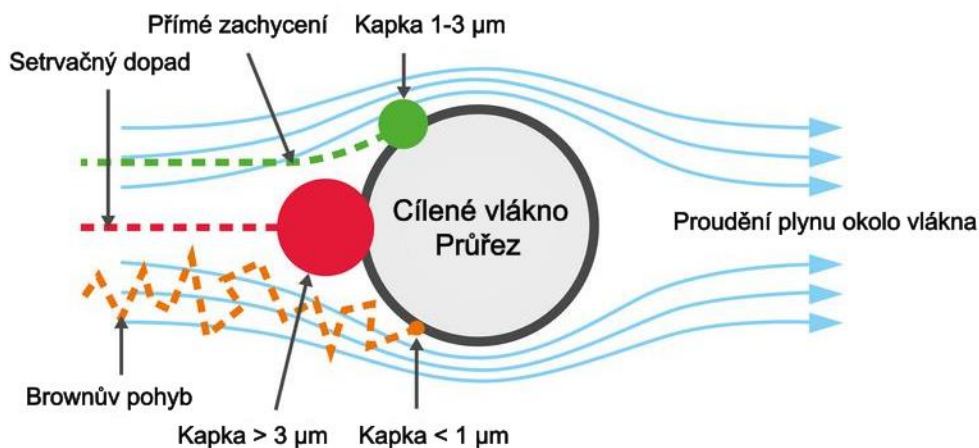
Výsledkem zmíněných výhod je potenciál na úsporu nákladů v průmyslu [15]. Tento typ separátoru není vhodný pro aplikace, při kterých dochází ke změnám průtoku ve větším rozsahu, jelikož účinnost odstranění kapek klesá se snižující se rychlostí plynu [7]. Metoda odstředivého separátoru bude podrobněji popsána v samostatné kapitole 3.

2.7 Klasifikace výplňových odlučovačů kapek

Kapičky stržené a unášené proudem plynu, jenž se nevyseparovaly na vstupním aparátu a v gravitační sekci usazování separátoru, se odstraní pomocí zařízení zvaném odlučovač kapek. Ten bývá obvykle instalován uvnitř separační komory jako konečná úprava plynu, ale může se použít i samostatně [6]. Mohou být aplikovány také přímo v destilačních kolonách, pračkách plynu, odparkách a parních bubnech. Níže je uvedeno několik bodů, které vystihují důležitost odlučovačů kapek [21].

- Výrazně snižují spotřebu jinak cenných chemikálií například v absorpčních kolonách a regeneračních věžích.
- Umožňují efektivnější provoz procesních zařízení, tam kde se dostává do styku kapalina s plynem.
- Zabraňují kontaminaci produktů a otravě drahých katalyzátorů.
- Pomáhají snižovat znečištění ovzduší tím, že snižují emise kapiček na ekologicky přijatelnou úroveň.
- Poskytují ochranu zařízení před jejich poškozením způsobeným kapkami kapaliny a eliminují tak problémy s údržbou.

K dispozici je celá řada různých typů odlučovačů kapek, které se opírají o odlišné separační principy. Jedná se o setrvačný dopad, přímé zachycení a Brownův pohyb viz obr. 6 [10]. Dnes se navrhuje a vyrábí obecně čtyři různé třídy odlučovačů kapek. Jsou to odlučovače tvořené z drátěného síta, z mikrovláken, ze svazku lamelových profilů a cyklony [21].



obr. 7: Mechanismy sběru kapiček, upraveno [10]

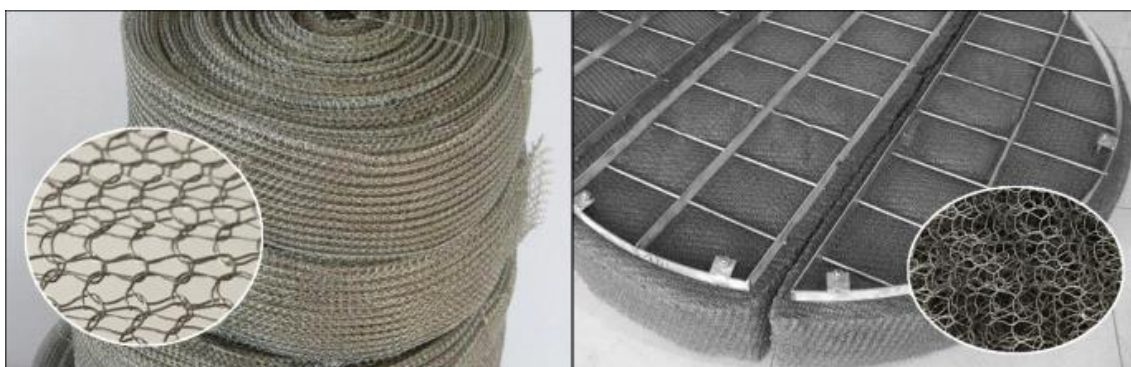
- **Setrvačný dopad** - Kapky větší než 3 mikrony nejsou schopné sledovat proudnice plynu při změně směru vlivem vyšší hybnosti a vychylují se od nich [10]. Následně dochází ke kolizi vychýlené kapky s povrchem vlákna, drátu

či lamely. Účinné odloučení kapek tímto mechanismem se pohybuje při proudění plynu v rozmezí 1-10 m/s [14].

- **Přímé zachycení** - Kapky o velikosti 1-3 μm se oddělí přímým nárazem o cílený povrch. Tato situace nastane pouze u kapiček, které následují proudnici plynu v těsné blízkosti vlákna. Například pro kapku o velikosti 1 mikron by měla být vzdálenost 0,5 mikronu [10]. Kapičky se také mohou zachytit mezi sousední vlákna či dráty. Se snižujícím se prostorem mezi vlákny/dráty roste míra zachycení menších kapek. Rychlost plynu pro účinné zachycení kapiček se pohybuje od 0,2 do 0,8 m/s [14].
- **Brownův pohyb** – Extrémně malé kapičky se srážejí s molekulami plynu, které jsou jimi obklopeny. Výsledkem je chaotický a trhavý pohyb ze strany na stranu. Kapičky se pohybují směrem k vláknům, ale i od nich. S klesající velikostí kapičky roste náhodný pohyb, tím vzniká i větší pravděpodobnost srážky částice s vláknem či drátem [10]. Tento mechanismus nastává při rychlostech plynu obvykle pod 0,2 m/s, ale i při rychlosti 0,25 m/s, jež je považována za maximální [14].

2.7.1 Drátěné

Drátěný odlučovač může mít různou hustotu a pórovitost. Běžně se používá pro gravitační separátory plyn–kapalina. Má schopnost eliminovat téměř všechny kapky o rozměrech větších než 5 μm a to při dosažení povrchové rychlosti plynu v rozsahu 0,2-5 m/s. Tvar odlučovače lze přizpůsobit tvaru daného separátoru. Široce používanými materiály pro zhotovení drátěného modulu jsou nerezová ocel a plastová vlákna, ale je možné aplikovat i jiné kovy. Odlučovač může být tvořen buď jednotlivými vrstvami drátěné sítě nebo sítí spirálovitě svinutou do válce viz obr. 8. Průměr plastového vlákna se pohybuje v rozmezí 0,15–3,8 mm a u nerezové oceli standardně dosahuje 0,28 mm. Tloušťka samotného odlučovače vytvořeného z drátěné sítě může dosahovat 100–300 mm [8].



obr. 8: Drátěný odlučovač svinutý do válce (vlevo) a pletený do podložky (vpravo) [22]

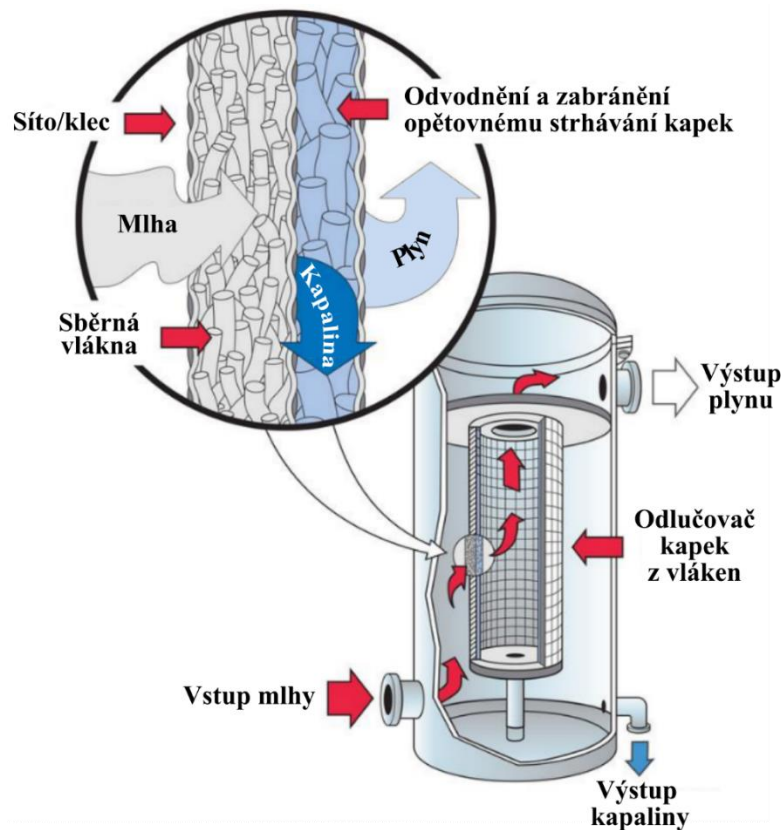
Kapičky unášené v plynu narážejí do síta z drátu, kde se spojují do větších kapek. Účinnost tohoto typu odlučovače závisí zejména na rychlosti. Při vysokých rychlostech plynu může v drátěném odlučovači znovu docházet ke strhávání již jednou odloučených kapek. Příliš nízké rychlosti způsobí, že kapičky budou společně s plynem procházet skrze síťový modul, aniž by byly zadržovány [6].

Drátěné moduly nejsou vhodné pro čištění plynů s vysokým znečištěním, jelikož se mohou snadno zanést a ucpat. Výkon odlučovače ovlivňují dva faktory, a to účinnost eliminace kapek a maximální poměr plyn/kapalina. Není také schopné pojmout vysoké zatížení kapalinou, proto se musí pravidelně vyměňovat za nové. Naopak mezi výhody se řadí snadná instalace, nízké tlakové ztráty a vysoká účinnost separace pro kapičky o velikosti 3-10 μm [6].

2.7.2 Vláknové

Vláknité odlučovače kapek se vyrábí v různých konfiguracích. Modul je obecně tvořen náhodně orientovanými vlákny, jež jsou zabalena mezi výztužná síta. Tím vznikne vláknité lůžko typicky dosahující tloušťky 25-75 mm, lze dle požadavků zhotovit i lože o vyšších rozměrech [8]. Lože odlučovače se vyrábí z velmi jemných chemicky odolných skleněných nebo syntetických vláken, případně z dalších speciálních typů vláken. Síta či klece se zhotovují z různých svařitelných kovů, plastů nebo z pryskyřice vyztužené sklem [10]. Modul odlučovače má obvykle podobu válce nebo plochého panelu [6].

Kapky o velikost větší než 2-3 μm se na filtru zachytí vlivem inerciálního dopadu nebo přímého nárazu. Separace menších kapiček vzniká v důsledku Brownova pohybu. Účinnost posledně zmíněného mechanismu se zvyšuje s dobou zdržení [8]. Filtry tvořené vlákny mají tedy schopnost zachytit submikronové kapičky o rozměru 0,1 mikronu i menší [6]. Všechny odlučovače kapek založené na sběru kapek jemnými vlákny fungují podobným způsobem viz obr. 9 [10].

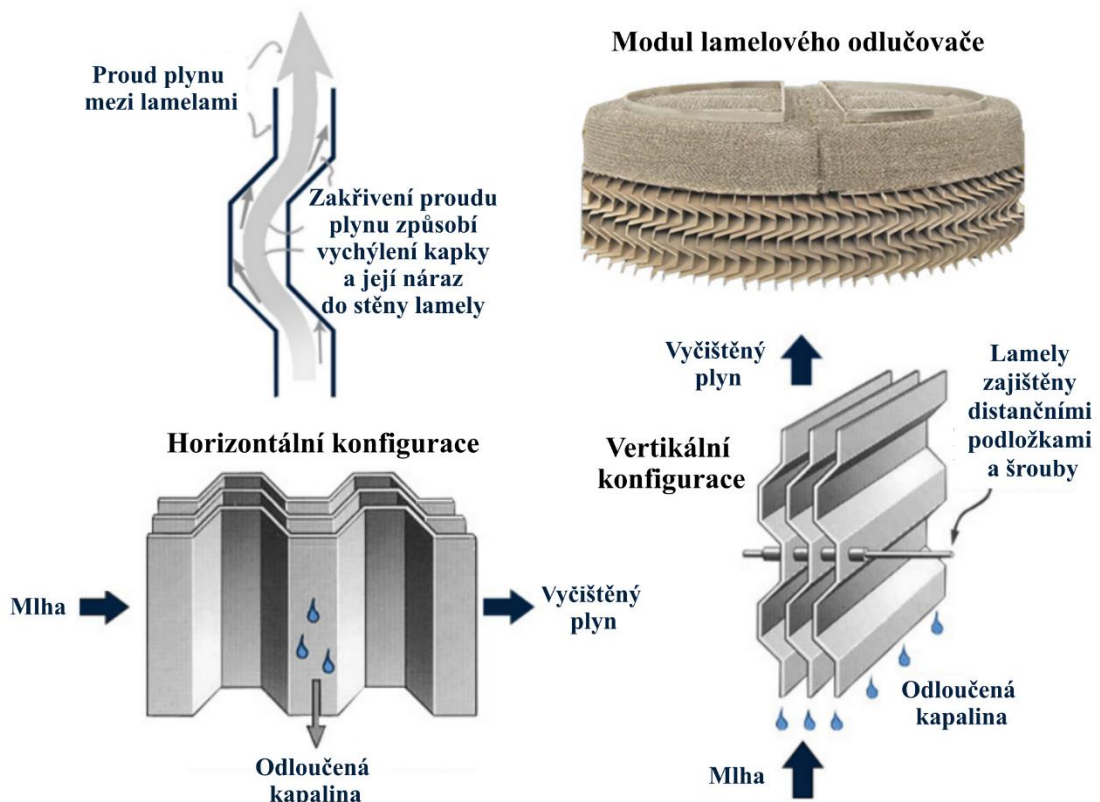


obr. 9: Princip vláknitého odlučovače, upraveno [10]

Plyn nesoucí kapičky kapaliny proudí skrze vláknité lože v horizontálním směru. Na jednotlivých vlákních uvnitř tohoto lože jsou zachycovány kapičky, které se v důsledku koalescence spojují za vzniku kapalného filmu. Kapalným filmem se vlivem proudění plynu pohybuje přes vláknité lože a kapalina působením gravitace odtéká spodní částí lože a je odváděna kontinuálně z nádoby. Přidání druhé hrubší vrstvy vláken urychluje odvodnění a zabraňuje opětovnému strhávání kapaliny ve formě kapiček do proudu plynu [10].

2.7.3 Lamelové

Modul odlučovače se skládá z paralelně umístěných lamel a je dimenzován pro laminární proudění plynu, jenž prostupuje v meziprostoru. Tvar zakřivení lamel se formuje obecně do klikatého či sinusového vzoru. K separaci kapiček se využívá tedy náhlá změna směru pohybu a koalescence. Setrvačnost kapek způsobí náraz na cílený povrch lamel, kde se kapky spojují. Kapalina se následně odvede do akumulární sekce na kapalinu v separátoru. Mezera mezi sousedními lamelami je okolo 25 až 38 mm. Tloušťka modulu se obvykle nachází přibližně v rozsahu 150-300 mm. Rozsah tlakových ztrát vyvolaný odlučovačem může dosahovat přibližně 125-870 Pa [6]. Montáž lamelových modulů lze realizovat v horizontální nebo vertikální poloze viz obr. 10 [23].



obr. 10: Princip lamelového odlučovače, upraveno [23]

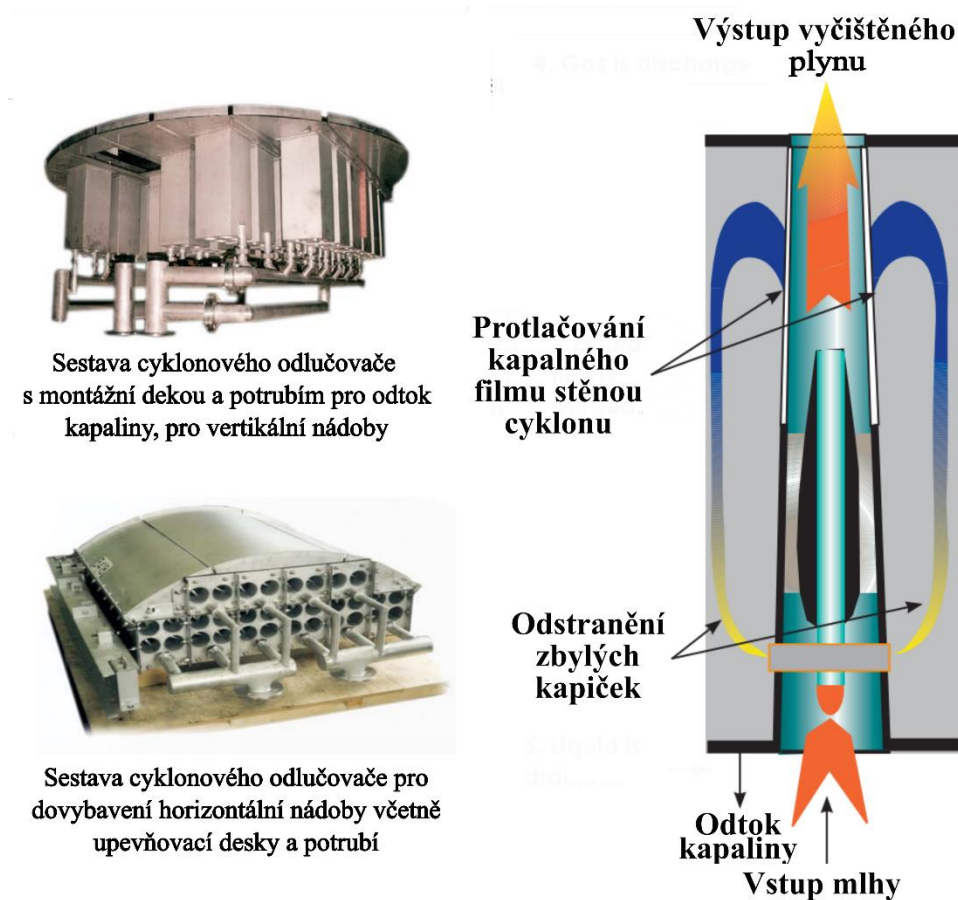
Lamely se dnes vyrábí z různých materiálů, jedná se například o polypropylen, polymer výztužná skelná vlákna, polysulfon a nerezovou ocel [6]. Lamelový typ odlučovače je standardně vhodný pro vyšší poměry plyn/kapalina a pro oddělování kapek o velikosti vyšší než 40 μm . V procesních systémech se široce používá pro separaci kapek obohacenými pevnými částicemi. V porovnání s jinými typy odlučovačů jsou méně

účinné při eliminaci velmi malých kapiček. Avšak lze dosáhnout vyšších účinností pro kapičky menší než 15 μm při speciálních konstrukcích [7].

2.7.4 Cyklonové

Obecně se cyklonové odlučovače dělí dle typu vstupu plynu na tangenciální a axiální. Tangenciální cyklony se běžně aplikují pro separaci kapek z proudu plynu jako samostatná zařízení viz podkapitola 2.6, zatímco axiální cyklony se používají jako vnitřní zařízení uvnitř separačních nádob [6].

Cyklonové axiální odlučovače kapek jsou sestaveny z několika cyklonů situovaných v jednom modulu. Předností této konstrukce je velmi vysoká kapacita pro manipulaci s plynem a eliminace kapiček s vynikající účinností i za vysokých provozních tlaků. Konstrukce odlučovače se vyrábí z běžných slitin a dle konfigurace lze rozdělit na horizontální a vertikální viz obr. 11 [21].



obr. 11: Princip a sestavy cyklonového odlučovače, upraveno [21].

Oddělení kapiček z proudu plynu v axiálním cyklonu je založeno zejména na odstředivé síle. Mlha vstupuje nejprve do elementu, jenž generuje vír a přenáší na částice vysokou odstředivou sílu. Tato síla způsobí vymrštění kapiček na konci vířivého prvku směrem ven na vnitřní stěnu cyklonu. Zde probíhá koalescence a vznik kapalného filmu, který je protlačován štěrbinami ve stěně cyklonu společně s malým množstvím plynu do vnější komory. V této komoře se odděluje většina kapaliny od plynu. Plyn obsahující nevyseparované kapičky se přivede zpět do nízkotlaké části cyklonu, aby se odstranila

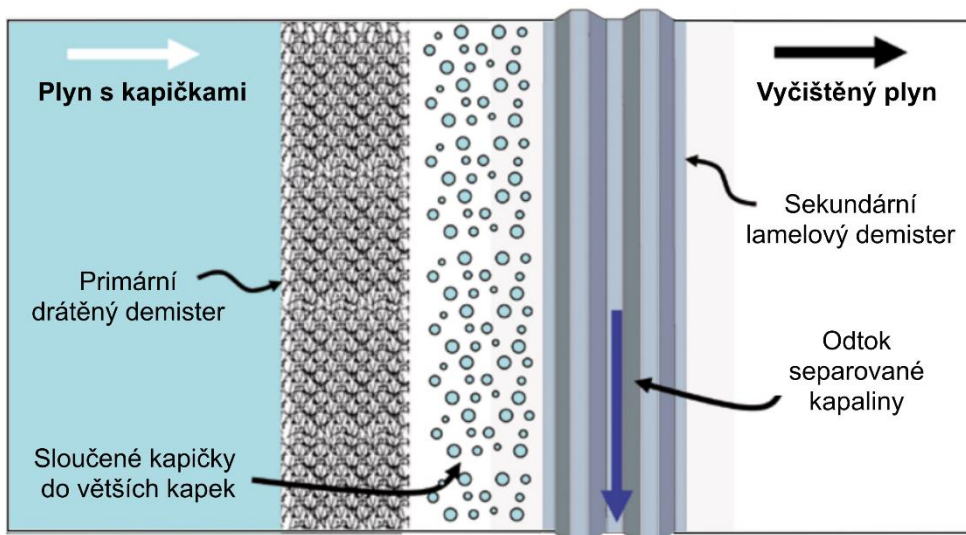
zbylá kapalná fáze. Vyčištěný plyn se vypouští horní částí odlučovače, zatímco kapalina odchází spodní sekci [21].

Cyklonové odlučovače jsou vhodné pro vysokotlaké aplikace. Zvýšení stávající kapacity lze provést úpravou odlučovače, tedy není nutná instalace nové nádoby. Vysoká účinnost odlučování kapiček o velikosti menší než 10 mikronů i za vysokých tlaků. Zařízení je schopné zvládat široký rozsah průtoků plynu. Instalace cyklonového modulu do jednotky není komplikovaná. Cyklonový odlučovač minimalizuje požadavky na výšku a průměr nádoby, tím poskytuje řešení s nejnižšími náklady. Tedy redukce velikosti a hmotnosti jednotky může vést k nižším nákladům na dopravu a instalaci zařízení [21].

2.7.5 Kombinované

V posledních dekádách byly navrženy duální odlučovače kapek za účelem spojení přednosti jednotlivých konvenčních zařízení pro odstraňování stržené kapaliny a získání vyšší účinnosti separace kapalného úletu z proudu plynu. Například demister lamelového typu lze aplikovat bezprostředně před nebo za drátěný odlučovač [6].

U konfigurace s lamelovým modulem až jako druhým v pořadí se nejprve separují malé kapičky na drátěném demisteru, který funguje jako koalescer. Zde se shlukují do větších kapek, jež jsou znovu strhávány vlivem rychlosti proudění plynu přesahující rychlost návrhovou. Stržené kapky dosahují velikosti výrazně překračující spodní limit pro lamelový odlučovač, na kterém dojde k jejich odloučení. Aplikace této konfigurace je vhodná pro separaci plynu s nízkým obsahem kapalně fáze a jemnými kapičkami viz obr. 12 [6].



obr. 12: Princip kombinovaného odlučovače, upraveno [24]

Ve druhém uspořádání se využívá jako hlavní odlučovač lamelového typu, kde jsou eliminovány kapky větších rozměrů. Jemné kapičky kapaliny nezachycené na prvním stupni duálního odlučovače se zachytí dále na drátěném demisteru. Tato konfigurace by mohla být efektivní pro plyn s vysokým obsahem kapaliny a separaci stržených kapek větších rozměrů [6].

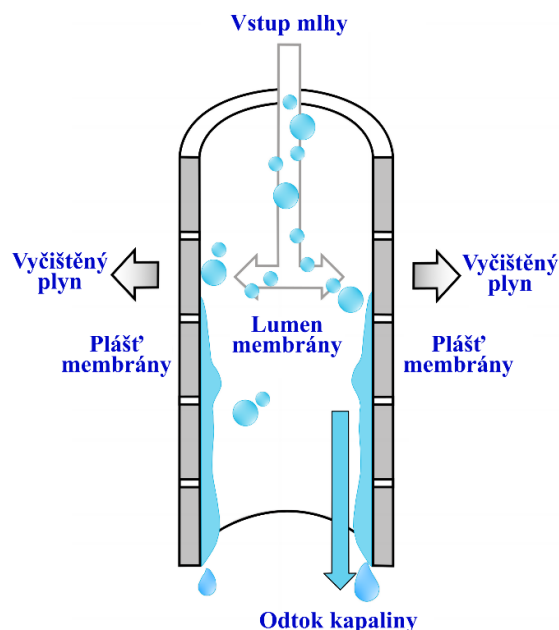
Dvojité kombinované odlučovače se dnes stávají běžnou záležitostí v provozech, jelikož jsou kladeny vysoké požadavky na účinnost separace kapalného úletu z procesních plynů, a tedy i na kvalitu produktu. Dnes jsou ve vývoji další kombinace různých odlučovačů kapek, například spojení cyklonového odlučovače s lamelovým [6].

2.7.6 Membránové

Jedním ze strategických přístupů je využití keramické membrány jako odlučovače kapek, jenž se nachází ve fázi vývoje a vykazuje slibné výsledky [6].

Membrána má schopnost zachytit a oddělit z proudu plynu velmi malé kapičky o velikosti do 0,1 mikronu. V porovnání s konvenčními odlučovači dosahuje větší kapacity na jednotku objemu, jedná se tedy o kompaktnější systém. Výhodou je možnost zpětného proplachování membrány, což prodlužuje životnost a umožňuje nepřetržitý provoz [6].

Modul odlučovače může být sestaven z několika keramických membrán situovaných v nerezovém pouzdře. Do provozu je vhodné aplikovat jeden záložní modul navíc, který bude v pohotovostním režimu. V případě, kdy významně poklesne výkon jednoho modulu kvůli vzniklým úsadám, bude automaticky spuštěn záložní modul. Odstavený modul se mezitím očistí zpětným proplachem. V separační jednotce se nachází několik paralelně umístěných modulů. Princip odloučení kapaliny z plynu keramickou membránou je uveden na [6].



obr. 13: Princip odlučovače z keramické membrány, upraveno [6].

Membránový odlučovač využívá k oddělení kapek kapaliny z proudu plynu keramická vlákna. Mlha vstupuje do lumenu membrány, což je dutý prostor uvnitř keramických vláken. Jak mlha proudí skrze lumen, dostávají se přítomné kapičky úletu do kontaktu s vnitřní stěnou vlákna, což způsobí jejich zachycení. Odloučená kapalina odtéká spodní částí lumenu do sběrné části na kapalinu situované na dně membránového modulu. Plyn mezitím prochází malými póry ve stěně membrány a vystupuje v horní části pláště membránového modulu. Hnací síla, umožňující prostup plynu skrze póry, je generována tlakovou diferencí mezi vnitřním a vnějším prostorem membrány [6].

3 Cyklonový odlučovač

Odstředivé separátory/cyklony jsou všestranná mechanická zařízení a mají širokou škálu uplatnění v průmyslové sféře. Specifické typy cyklonů jsou aplikovatelné na níže uvedené procesy [25].

- Čištění kapalin
- Koncentrování suspenzí
- Oddělení dvou pevných frakcí
- Separace dvou nemísitelných kapalin
- Odplynění kapalin
- Odstranění kapiček z nosného plynu

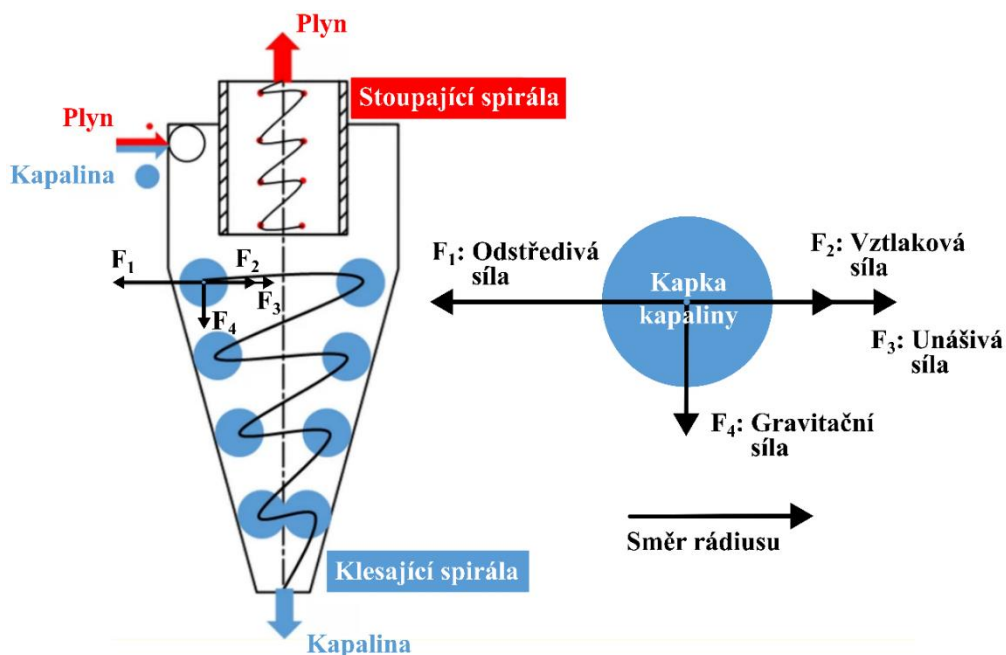
Uvnitř cyklonů, jež mají relativně jednoduchou konstrukci, se nachází komplikovaný vzor proudění a složité chování částic určených k separaci. Akademický a průmyslový výzkum se věnuje odstředivým separátorům přibližně již 90 let. Zejména se zaměřuje na separátory velkých rozměrů, vzhledem k jejich praktickému významu v průmyslovém odvětví. Existují i odstředivé odlučovače o průměru do 0,1 metru, jež naleznou uplatnění v nejrůznějších oblastech včetně odběru vzorků bioaerosolů (enzymy, pyl, bakterie a viry), aerosolových dávkovačů (systémy pro padávání léků), cyklonových vysavačů, předfiltrace pevných částic ve ventilačním systému automobilů a spalovacích motorů [26].

Tradiční cyklony plyn–kapalina jsou typem mechanického separátoru, který odděluje dispergovanou fázi (kapičky) z kontinuální fáze (plynu) za využití odstředivé síly, přičemž fáze mají různé hustoty [27]. Hodnota odstředivé síly dosahuje několikanásobku gravitační síly [8]. Vyšší odstředivá síla tak významně zintenzivní rychlost separace kapek. Výsledkem toho jsou kompaktnější rozměry nádoby jako celku [28]. V posledních dvou dekádách tyto cyklonové odmlžovače nabývají na důležitosti a nyní jsou centrem pozornosti v plynárenském a ropném průmyslu, zejména pro aplikace na moři. Zde nahrazují drahé, rozměrnější a méně účinnější gravitační separátory. Dále se například používají pro ochranu kompresorů a plynových turbín před znečištěním a erozí [29].

Tato kapitola se zaměřuje na detailnější popis odstředivých separátorů, respektive plynových cyklonů s reverzním tokem. V úvodní části bude popsán základní funkční princip odloučení kapaliny z plynu, výhody a nedostatky pro aplikaci v průmyslové sféře a porovnání s cyklony určenými k eliminaci pevných složek. Dále uvádí přehled základních konstrukčních provedení a popis proudění uvnitř separační komory. V závěru bude představena geometrie cyklonu a budou zmíněny faktory ovlivňující celkový výkon separace.

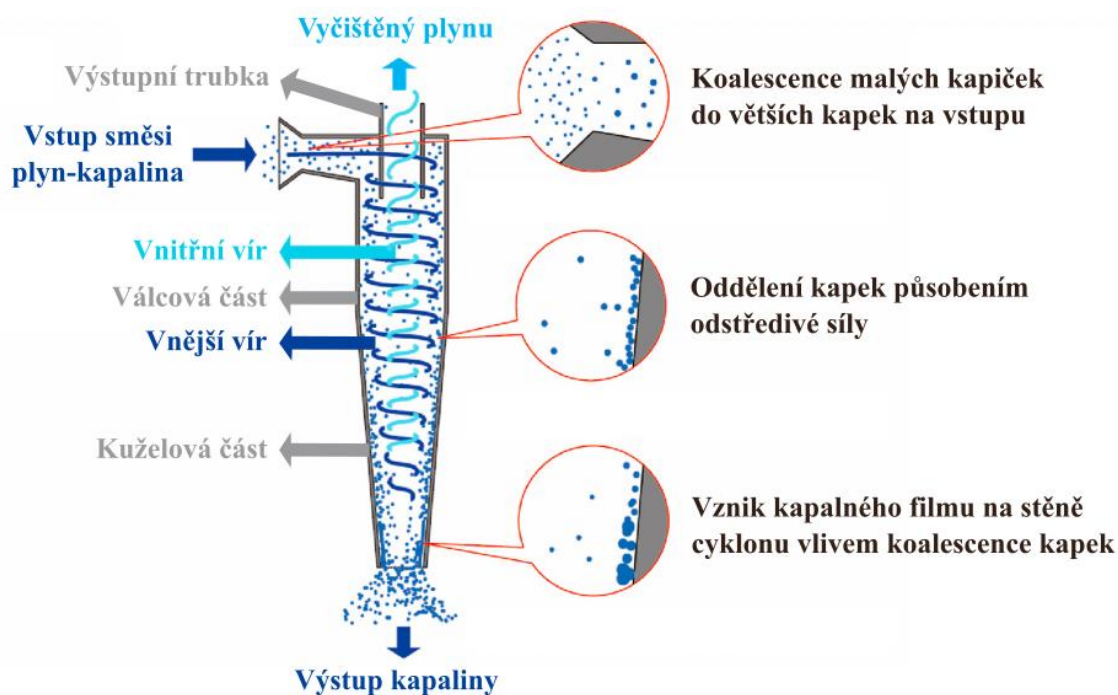
3.1 Princip odloučení kapek z nosného plynu

Princip separace kapalného úletu z nosného plynu v cyklonovém odlučovači je založen na působení několika typů sil ve vertikálním i horizontálním směru, jedná se o gravitační sílu, vztlakovou sílu, unášecí sílu a dominantní odstředivou sílu (hnací sílu separace) viz obr. 14 **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** [30].



obr. 14: Silová analýza kapky v cyklonu, upraveno [26]

Plyn obsahující unášené kapičky kapaliny vstupuje do separační komory cyklonu tangenciálním vstupem za daného tlaku a rychlosti. Tím generuje vířivé proudění (vnější vír) o vysoké rychlosti pro určitou konstrukční geometrii odlučovače a stabilní pole odstředivé síly. Dispergovaná fáze o větší hustotě je odstředivou silou z plynu vymrštěna radiálně ke stěně separační komory, kde se shlukuje za vzniku kapalného filmu, jenž stéká směrem dolů do sběrné části na kapalinu. Kontinuální fáze vyvíjí druhý vír v centrální části kužele, vyčištěný plyn zde začne stoupat spirálovitě vzhůru a opouští cyklon přes výstupní trubku viz obr. 15 [31].



obr. 15: Ilustrativní schéma cyklonového odmlžovače, upraveno [27]

3.2 Přednosti a nedostatky

Cyklonové separátory jsou dnes široce používané v průmyslu za účelem úpravy plynu kvůli jejich schopnosti účinně separovat částice z proudu plynné složky. Vysoká rychlost plynu generuje silnou odstředivou sílu, jež umožňuje efektivně odstranit nežádoucí částice o velikosti větší než 5 mikronu. Výsledkem je tedy vysoká účinnost separace až 98-99,5 % [32]. Obvykle se cyklony používají v situacích, kdy mlha není příliš jemná, tedy kapičky jsou spíše větších rozměrů a snáze se tak oddělují. Používají se také, když daný pokles tlaku je přijatelný a když se požaduje zpracování velkého množství kapaliny na malé zastavěné ploše. V porovnání s ostatními typy separátorů směsi plyn–kapalina dosahují mnohem menších rozměrů [27].

Nicméně pokud se sníží celkové rozměry cyklonu, poklesne společně s nimi výrazně i výkon. Navzdory tomuto omezení jsou cyklonové separátory často preferovány v průmyslových technických systémech kvůli jejich kombinaci vysoké separační účinnosti a relativně nízkého hydraulického odporu [32]. Cyklonové odlučovače se vyznačují několika výhodami a nevýhodami viz níže [25].

- **Výhody** – Cyklony se vyznačují nízkými investičními náklady a požadavky na údržbu, absencí pohyblivých součástí a schopností provozu za extrémních podmínek při zachování vysoké spolehlivosti [33]. Tedy volbou vhodných materiálů a metod na zhotovení konstrukce lze navrhnout separátor tak, aby mohl být provozován za vysokých tlaků a teplot a za použití korozivních plynů [34]. Ve srovnání s konvenčními gravitačními separátory mají nižší dobu zdržení. Retenční doba udává čas, po který se směs plynu s rozptýlenými kapičkami nachází uvnitř cyklonu za účelem dosažení uspokojivé separace [25].
- **Nevýhody** – Jedním z omezení cyklonových odlučovačů je jejich citlivost na kolísání tlaku, průtoku mlhy a vstupní koncentrace kapek v nosném médiu. Dále jsou náchylné k otěru za přítomnosti pevných látek v plynu. Vyznačují se také relativně nízkou propustností vztahující se na objem průtoku, který separátor dokáže pojmout. Respektive propustnost cyklonů roste úměrně s velikostí separátoru [25].

V praxi využitelné cyklonové odlučovače běžně dosahují velikosti 25–3000 mm a více. Tlakové ztráty uvnitř cyklonu se mohou pohybovat v rozsahu 98-1960 Pa za vstupní rychlosti média v rozmezí 7-30 m/s. Lze navrhnout cyklony pro provoz za teplot do 1000 °C a za tlaku až 50 MPa. Dle požadavků je možné odstředivý odlučovač zhotovit ze široké škály materiálů a zajistit tak jeho flexibilitu použití pro dané prostředí [28].

3.3 Komparace s cyklony plyn–pevná látka

Cyklony používané pro eliminaci kapalných částic z plynu jsou velmi podobné z hlediska funkčního principu a konstrukce těm pro separaci systému kapalina–pevná frakce, jelikož oba typy zahrnují oddělování částic z proudu plynu. Podobnost dvoufázové separace však ustane při způsobu sběru částic, jelikož kapalně a pevné částice se vyznačují různými statickými a dynamickými vlastnostmi [25]. Níže jsou popsány faktory, jež usnadňují proces odloučení kapaliny z nosného plynu oproti separátorům na odstranění pevné frakce [35].

- Kapky kapaliny dispergované v plynu se snadněji shlukují za vzniku většího objemu než pevné částice, výsledkem je rychlejší separace [35]. Tedy doba zdržení kapky v odlučovači je kratší ve srovnání s prachovými cyklony [28].
- Pevné částice unášené plynem se při nárazu do stěny cyklonu mohou odrážet zpět do proudu, kterým budou dále unášeny. Zatímco kapičky budou mít tendenci se slučovat se stékajícím kapalným filmem na stěně komory za disipace jejich kinetické energie [35]. Kapalným úlet, jenž se dostane do kontaktu se stěnou, se zachytí v důsledku působení kombinace tření, povrchového napětí a Van der Waalových sil [36]. Větší kapalnou hmotu nelze tak snadno strhnout ze stěny zpět do plynné fáze jako pevné částice [29]. Při vhodném návrhu tedy mohou být cyklony efektivnější pro separaci kapaliny z proudu plynu [8]
- Pro odvod prachových částic je nutná dlouhá spodní kuželovitá část cyklonu, která má významný vliv na účinnost separace. Zachycenou kapalinu lze vypouštět i jinak než centrálním odvodem, který může zapříčinit opětovné strhávání částic či ucpání systému [35]. Pevné částice mohou být staticky nabitě nebo lepkavé, což zvyšuje pravděpodobnost zanášení, proto otvor pro jejich odvod musí mít větší rozměr než pro kapalinu [29].
- Relativní odolnost vůči erozi a ucpání a tvorba kapalných filmů na stěnách umožňují konstruktérům se zaměřit na konstrukční detaily, které nejsou běžné u cyklonu na separaci pevných částic z plynu. Odlučovače kapaliny mohou být tedy vybaveny širokou škálou různých vnitřních prvků za účelem zvýšení účinnosti separace [29].

3.4 Klasifikace dle konstrukce

V posledních letech byla konstrukce více standardizována. Varianty provedení se odlišují mechanismem pro vytvoření víru plynu. Jedná se buď o tangenciální vstup nebo stacionární vířivé lopatky. Další rozdíl souvisí s typem a polohou výstupu plynu, který může být situován na stejném nebo opačném konci jako vstup. Plyn může také opouštět separátor periferně nebo axiálně [28]. Cyklony lze tedy rozdělit do dvou skupin podle způsobu, jakým bude probíhat separace kapek z plynu. Jedná se o cyklony buď s reverzním nebo axiálním tokem plynu [25].

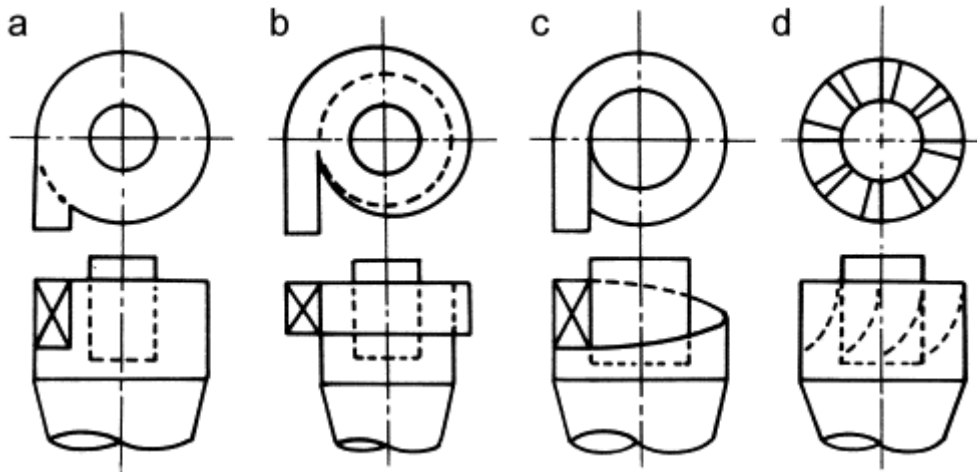
3.4.1 Cyklony s reverzním tokem

Plyn je přiváděn tangenciálně v horní části jednotky a klesá po spirálovité trajektorii mezi stěnami cyklonu a výstupní trubicou dolů. Spirála pokračuje podél vnější stěny zařízení až na konec kuželovité části. Zde plyn přechází plynule do vnitřního centrálního víru, který je tvořen spirálovitou dráhou o menším poloměru a směřuje vzhůru k výstupní trubce. Takto vznikají dva víry, jeden vnitřní a druhý vnější, přičemž se oba spirálovitě otáčejí v opačných směrech [25]. Obvykle je odhadována velikost vnitřního víru na 0,5–1 násobek průměru výstupní trubky. V prstencovém prostoru v horní části jednotky část plynu proudí podél stěny cyklonu nahoru přes horní část a dolů po vnější straně výstupní trubky. Tímto je vytvořen prstencový vír, jenž se často nachází v cyklonech [28].

Kapky jsou z víru vymršťovány směrem ke stěně cyklonu vlivem odstředivé síly. Vyšší setrvačnost umožňuje pohyb přímočaře, tedy odlétají z víru po tečně. V některých případech může plyn vstupovat do cyklonu axiálně přes stacionární specificky tvarované lopatky, které zapříčiní opět vířivé proudění. Hlavní nevýhodou cyklonu s reverzním

tokem je velký pokles tlaku, jenž vyžaduje tomu odpovídající spotřebu energie. Vstup a výstup cyklonu jsou vůči sobě v pravém úhlu, což ztěžuje jejich umístění v jedné linii s proudem plynu v systému. [28].

Existuje několik provedení hlavního vstupu, kterým lze přivést znečištěný plyn s vysokou tangenciální složkou rychlosti do cyklonu viz obr. 16. Nejčastěji se používá tangenciální a spirálová konfigurace. Spirálový vstup běžně obepíná válcovou část separační komory ze 180°. Lze aplikovat i menší oblouky, naopak větší ovinutí zvyšuje tlakovou ztrátu a již nepřispívá k vyšší účinnosti, proto se nepoužívá [37].



obr. 16: Uspořádání hlavního vstoku: a) tangenciální, b) spirálový, c) šroubovitý, (d) axiální [37]

Dle geometrie těla nádoby lze klasifikovat odstředivé separátory s reverzním tokem na válcové a kuželové [27].

- **Kuželové cyklony** – Jsou zhotoveny z horní kratší části tvořené válcovým pláštěm a spodní delší částí v podobě kužele. Toto provedení je vhodné pro nízkotlaké aplikace [27]. V blízkosti dna kuželové části dochází k nárůstu tangenciální rychlosti, což umožňuje odstranění menších částic [34]
- **Válcové cyklony** – Tato válcová konstrukce je vhodná pro oddělení kapaliny od plynu pod vysokým tlakem [27]. Výhodou vynechání konické zóny je možnost postavení kompaktnějšího separátoru a zamezení uniknutí víru ven z cyklonu do sběrné části na kapalinu, kde vzniká nebezpečí opětovného strhávání částic [35].

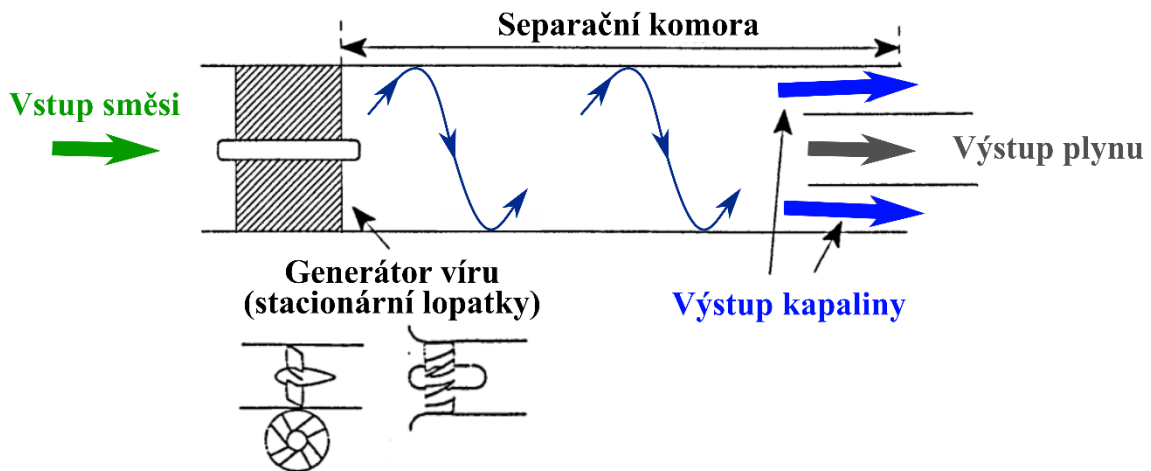
Pro cyklony pára-kapalina existuje několik různých designových geometrií a konfigurací, z nichž na obr. 18 lze vidět provedení považované za „standardní“. Většina odlučovačů typu pára-kapalina či cyklonů na eliminaci mlhy nezahrnuje v konstrukci kuželovitou část, tedy tělo separátoru je zhotoveno pouze jako válec. Komora cyklonu se využívá nejen jako separátor kapek z nosné páry, ale i jako nádoba na shromažďování kapalných složek. Z tohoto důvodu musí být zamezeno kontaktu konce víru s hladinou kapaliny, aby nedocházelo k jejímu strhávání proudem páry. Lze aplikovat nad zadržovanou kapalinou izolační desku neboli stabilizační desku víru, na které se vířivé proudění otáčí a mění směr a zabraňuje tak kolizi s kapalinou. Délka a/nebo průměr cyklonu pod oddělovací

deskou může být přizpůsoben dle požadované velikosti zadržovací kapacity, schopnosti zajistit náhlé zvýšení průtoku kapaliny a kontroly hladiny [29].

V těsné blízkosti výstupu kapaliny se vkládá přerušovač vírů, aby se negenerovala rotace kapaliny na dně separátoru vlivem momentu hybnosti přiváděné dvoufázové směsi. Víření kapalinové lázně by mohlo zapříčinit vtažení části spojitě fáze a vytvořit kavitaci čerpadla či jiné negativní účinky po proudu, dále omezuje výstup samotné kapaliny z cyklonu. Přerušovač víru má obvykle podobu kříže či kruhové desky vyrobené z tenkého plechu. Rychlost odváděné kapaliny by neměla přesáhnout přibližně hodnotu 1 m/s. Lze použít i perforované přepážky umístěné v dolní části na stěnách cyklonu, jež zpomalují rotaci akumulované kapaliny [29].

3.4.2 Cyklony s axiálním tokem

Na vstupu do cyklonu se nachází speciálně tvarované stacionární lopatky, které udělují plynu rotační pohyb. Vlivem rotace jsou kapky vytlačovány ke stěně za vzniku prstencového toku, zatímco samotný plyn proudí centrálně jednotkou. Spojitá fáze odchází axiálně výstupem situovaným na stejném konci jako výstup kapaliny viz obr. 17 [25]. Nashromážděná kapalina může být vypouštěna buď axiálním nebo radiálním výstupem. Použití radiálního výstupu snižuje možnost opětovného strhávání kapaliny a tlakové ztráty a je účinnější z důvodů vyššího výtlačného tlaku [35]. Válcové tělo umožňuje snadnější zapojení více axiálních cyklonů za sebou a zpracovat tak vyšší průtoky mlhy [25].



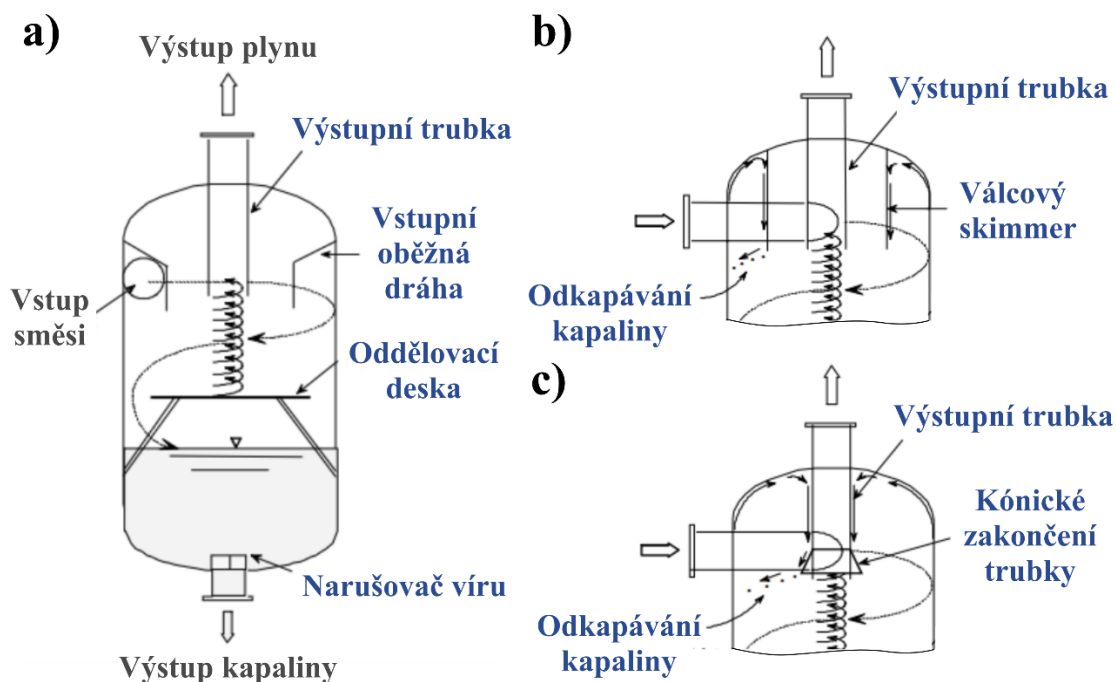
obr. 17: Schéma typického cyklonu s axiálním tokem, upraveno [25]

V cyklonu se nachází pouze jeden vír proudící v jednom směru. Nedochází tak ke smíšení čistého plynu s plynem obsahujícím kapičky v místě obrácení proudění víru jako u dříve popsaného typu cyklonu. Tím se také snižují tlakové ztráty jednotky, jež se skládá zejména z válcového pláště. Existuje varianta i s tangenciálním vstupem vyznačující se lepší účinností. Tangenciální vstup snižuje odskoky částic, tedy při nárazu kapalného úletu do stěny nedochází tak často k jeho odražení zpět do plynu jako při použití vírových lopatek [28]. Protože ty způsobují poměrně vysokou radiální rychlost částic v porovnání s tangenciální vstupem [35]. Cyklony s axiálním tokem se navrhují a vyrábí, tak aby pracovali buď v horizontální nebo vertikální poloze. Přičemž svislá zařízení vykazují lepší gravitační odvod kapalně složky [29].

3.5 Opětovné strhávání kapaliny

Při použití cyklonů pro odloučení kapek z plynu se na rozdíl od separace pevných látek musí uvažovat opatření, která zabrání opětovnému strhávání kapaliny a snížení účinnosti [8]. Tedy kromě predikce pravděpodobnosti eliminace částic z proudu plynu se při návrhu separátoru musí vzít v úvahu i možné negativní vlivy, které jsou popsány níže [32].

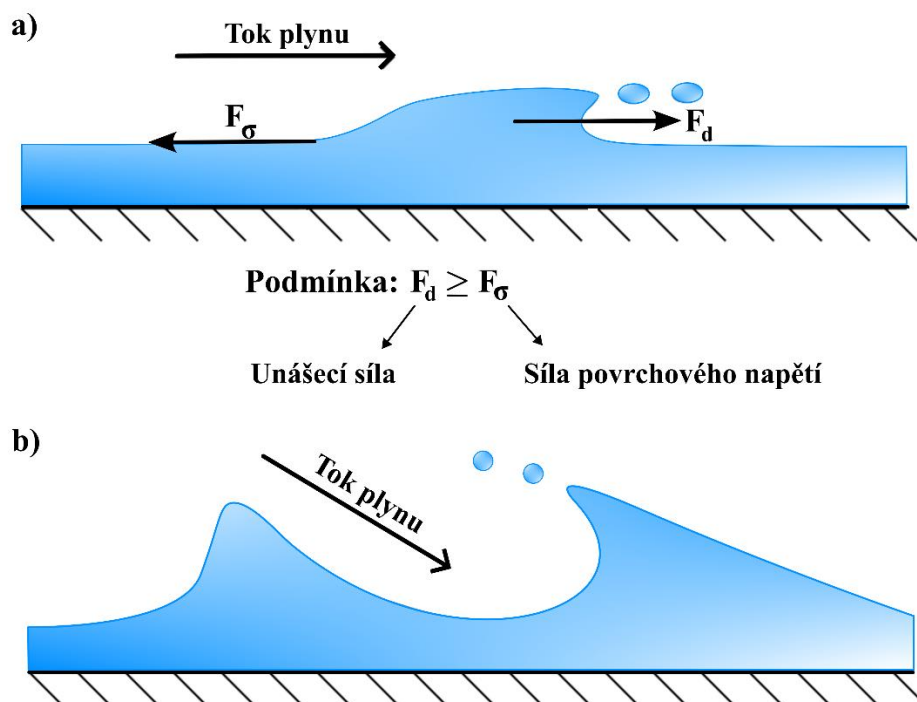
- **Vznik creepu kapaliny na střešní části cyklonu a výstupní trubce vlivem nízkého tlaku** - Část kapalného filmu má tendenci téct do oblasti s nižším tlakem situovaným v centrální části cyklonu, a to přes střešku komory až na výstupní trubku, ze které vniká do vyčištěného plynu [35]. Toto chování je vyvíjeno přítomnými sekundárními toky [29]. Zabránit strhávání lze přidáním kónického prodloužení výstupní trubky plynu viz obr. 18c. Tato rozšířená kuželová část umožňuje kapalině odkapávat z konce trubky, aniž by byla opětovně stržena proudem plynu. Prodloužení by mělo být kratší než délka výstupního potrubí a situováno pod spodní hranici přívodního potrubí. Tím se zabrání kolizi vstupního plynu s kónickou částí trubky, která by mohla způsobit erozi a snížení účinnosti. Na spodní okraj kužele se zhotovují vroubky nebo rýhy za vzniku větší povrchové plochy, čímž se podporuje odkapávání kapaliny [8]. Namísto kónického rozšíření lze za stejným účelem aplikovat prstenec kolem výstupní trubky, který nemusí být nutně umístěn až na jejím konci. Creep kapaliny může narůstat se zvyšující se hodnotou viskozity kapaliny a tlakovou ztrátou a případně se zmenšující se velikostí průměru komory [35]. Střešní válcový skimmer a oběžná dráha jsou dalšími prvky (obr. 18b. a obr. 18a), které lze aplikovat za účelem zabránění vtažení kapalného filmu do horní části cyklonu a následné na výstupní trubku. Výše zmíněné prvky by měly být použity při zatížení kapalinou nad 1 kg kapaliny/kg plynu. Přívodní potrubí by se nemělo nacházet těsně pod střeškou cyklonu, která by neměla být šroubovitého tvaru. Tím lze také minimalizovat creep kapaliny. Vzdálenost nástřikové trubky od vnějšího okraje střešky cyklonu by měla být aspoň jeden průměr vstupu. Dále je možné nasměrovat vstupní trubku pod mírným úhlem, například 10° . Požaduje se, aby přívodní potrubí mělo uklidňující (rovnou) délku, kdy poměr délky potrubí k jeho průměru by neměl klesnout pod hodnotu 5–10 [29].



obr. 18: Zabránění strhávání kapaliny: a) oběžná dráha, b) válcový skimmer, c) kónické zakončení výstupní trubky, upraveno [29]

- Stržení kapaliny z akumulací sekce cyklonu vlivem vírovému působení proudu plynu na hladinu** - Pokud úbytek dynamického tlaku vzestupných proudů plynu, jenž omývá shromážděnou kapalinu na dně komory, přesáhne 15-39 Pa, energie proudu bude dostatečně velká, aby strhávala kapalinu a generovala vzestupné toky kapalných filmů na stěnách cyklonu. Tyto kapalně filmy mohou případně odcházet společně s vyčištěným plynem výstupní trubkou. Výskyt tohoto negativního jevu lze omezit snížením dynamického tlaku proudění plynu. Maximální hodnota poklesu tlaku v separátoru se získává obtížně jak analyticky tak experimentálně [32]. Cyklony pro odloučení kapiček z plynu se vyrábí často s miskovitým dnem. Předějit strhávání je možné za použití cyklonu s dlouhou kuželovou částí a kontinuálním odtokem kapaliny. Lze aplikovat také přepážky pro přerušování víru na výstupu plynu a případně plochý kotouč umístěný v horní části kužele zasahující do vzdálenosti 2–5 cm od stěny [8]. Za použití cyklonu s miskovitým dnem lze aplikovat oddělovací desku, která izoluje konec víru plynu od kapalně fáze nacházející se na dně či stěnách separátoru viz obr. 15a [29].
- Oddělení kapiček z kapalného filmu na stěně v důsledku střížných sil proudu plynu** - Kapky se srážejí se stékajícím filmem kapaliny na stěně cyklonu, kde dochází k disipaci jejich kinetické energie. Výsledkem je pokles turbulentního proudění, které má tendenci strhávat kapalinu zpět do proudu plynu [28]. Jedná se o výsledek Kelvin–Helmholtzovi nestability, ke které dochází, když tlakový spád plynu v toku kapalného filmu podél stěny separátoru přesáhne 140–1000 Pa. Možnost stržení kapaliny nastává v situaci, kdy unášivá síla proudu plynu překoná sílu povrchového napětí [32]. Obecně lze strhávání redukovat snížením rychlosti vstupního plynu [8]. Strhávání kapalného filmu zpět do plynu způsobují pravděpodobně dva následující mechanismy uvedené na obr. 19. První

vzniká v důsledku odstřížení kapaliny turbulentním prouděním plynu z povrchu vlny, jež vzniká při vyšších hodnotách Reynoldsových čísel pro kapalný film. Naopak v situaci, kdy toto Reynoldsovo číslo je menší, dominuje mechanismus podříznutí hřebene vlny kapalného filmu plynem. V proudění tekutin se vyskytují setrvačné a vazké síly, jejichž poměr stanovuje Reynoldsovo číslo, tedy čím více převládají setrvačné síly, tím větší intenzita turbulentního proudění je přítomna [29].



obr. 19: Mechanismy stržení kapalného filmu: a) odstřížení kapaliny z povrchu vlny, b) podříznutí hřebene vlny, upraveno [29]

Zmíněné nežádoucí účinky mají dopad na celkovou účinnost cyklonu, jež klesá se zvyšujícím se poklesem tlaku uvnitř komory. To omezuje možnost použití odstředivých separátorů pro vysokotlaké aplikace a aplikace s vysokou rychlostí plynu, jež byly původně dimenzovány na provoz za podmínek blízcím se atmosférickému tlaku. Zvýšená tlaková ztráta v komoře tedy podporuje negativní vlivy a ztěžuje dosažení požadovaného výkonu cyklonu. Přítomnost kapalného filmu také může změnit drsnost povrchu stěny cyklonu, což může mít vliv opět na úbytek tlaku [35]. S tlakovými ztrátami narůstá úroveň energetické účinnosti separačního procesu [32].

3.6 Vzor proudění

Oddělení dvou fází s odlišnou hustotou vzniká v důsledku vysoce vířivého turbulentního proudění. Vířením plynu se generuje odstředivá síla působící na částice a turbulence působící rozptýl částic, čímž se zvyšuje možnost jejich zachycení ve výstupním plynu. Velikost unášených částic a podmínky proudění v cyklonu mohou značně ovlivnit oba jevy [38].

Na základě numerické simulace bylo prokázáno, že změna intenzity turbulence má účinek na dobu zdržení separovaných částic, která závisí na jejich velikosti a koncentraci v nosném plynu. U relativně velkých částic se zvýšením síly turbulence docílí vyšší retenční doby, zatímco u relativně malých částic bude tato doba nižší. Zvýšení turbulence nemá významný vliv na odlučivost větších částic, proto jejich zdržná doba může být delší ve srovnání s malými částicemi. Účinnost eliminace menších částic se snižuje se silou turbulence. Vyšší intenzita turbulence prodlužuje střední retenční dobu úletu, ale současně může způsobit transport odlučovaných částic do hlavního proudu plynu, čímž se zdržný čas může významně zkrátit [39].

Obecně lze pro cyklony s reverzním tokem kategorizovat viskózní proudění na primární a sekundární toky [40].

- **Primární proudy** – Do této kategorie se řadí proudění plynu přes vstup, vířivé proudění v separační komoře, mezní vrstvy na stěnách a proudění výstupní trubicou [40].
- **Sekundární toky** – Zahrnují mezní vrstvy na víku separátoru a prosakování přes okraj výstupní trubky, precesi vnitřního víru a Taylor-Görtler víry. Vznikají v důsledku nerovnováhy mezi tlakovým gradientem v radiálním směru, jež je generován z vířivého proudění o vysoké rychlosti, a setrvačnými silami. Tyto jevy vedou ke snížení účinnosti odloučení částic ze spojitě fáze [40]. V jádru cyklonu existuje také sekundární tok způsobující recirkulační pohyb částic [29].

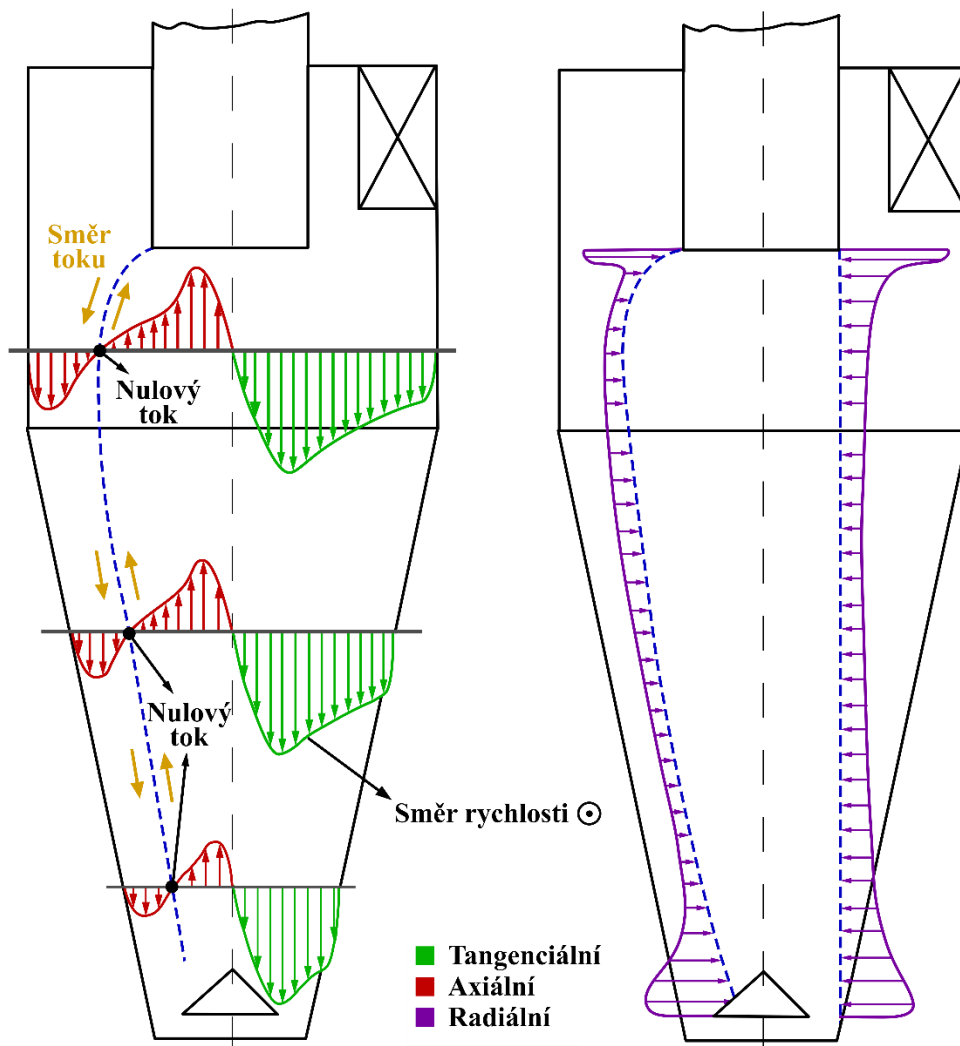
Tenká mezní vrstva v oblasti víka separátoru se vyvíjí vlivem nulové rychlosti na povrchu, tedy odstředivá síla klesá v blízkosti stěny a radiální tlakový gradient zůstává konstantní. Tím vzniká síla urychlující proudění mezní vrstvy do středu cyklonu. Tedy v situaci, kdy tok mezní vrstvy dosáhne výstupní trubky, bude nucen se pohybovat v axiálním směru dolů až na její okraj. Zde bude stržen centrálním vírem a společně s výstupním plynem odveden [40].

Víření plynu v odstředivých separátorech se chová výrazně asymetrický a nestabilně. V důsledku hydrodynamické nestability toku vzniká navíc precese vnitřního víru, což způsobuje vysoké kolísání rychlosti, a tím i turbulence [40]. Tedy v centrálním víru existuje místo, ve kterém se tok pohybuje pouze axiálně a průměrná obvodová rychlost se zde rovná nule. Tento bod se nenachází přesně na geometrické středové ose odlučovače, ale je laterálně posunutý. Tudíž vnitřní vír rotuje kolem své vlastní středové osy a tím vzniká její precese [41]. Největší laterální posun nastává v blízkosti výstupní trubky. Opětovné strhávání některých částic do vnitřního víru může být způsobeno právě změnou polohy jeho osy, částice následně mohou uniknout společně s plynem. S narůstající intenzitou precese se tedy snižuje separační účinnost. Precesi způsobuje asymetrie vstupního bodu cyklonu a lze ji minimalizovat za využití více vstupů, kdy rozložení proudového pole se stává symetričtější [42].

S primárním tokem interagují Taylor-Görtler víry, jež jsou generovány při styku turbulentního proudění s povrchem konkávního tvaru, jako je válcová část odlučovače. V blízkosti stěny se vyvíjejí odstředivé nestability vedoucí k tvorbě Taylorových vírů, tedy vzniká nestabilní proudění [41].

Plyn se v cyklonovém odlučovači pohybuje vysokým turbulentním prouděním, což způsobuje silně anizotropní turbulence a inherentní nestabilitu víru. Tok plynu je zásadně

trojrozměrný a sestává se ze tří rychlostních složek [40]. Níže uvedený obr. 20 představuje rozložení jednotlivých typů rychlosti proudícího plynu uvnitř cyklonového separátoru [43].



obr. 20: Rychlostní profil tangenciální, axiální a radiální složky celkové rychlosti, upraveno [43]

- **Tangenciální rychlost** – Obecně se jedná o největší složku celkové rychlosti plynu. Rychlostní profil v závislosti na axiální poloze v odlučovači zůstává téměř konstantní. Maximální hodnota této rychlosti běžně dosahuje trojnásobku vstupní rychlosti [40]. V mezní vrstvě se tečná rychlost postupně snižuje až na nulovou hodnotu u stěny [41]. Tangenciální rychlost narůstá se snižujícím se průměrem generovaných vnitřních víru. Vyšší hodnoty této rychlosti znamenají vyšší tlakové ztráty uvnitř cyklonu, jelikož oba tyto faktory spolu úzce souvisí [44].
- **Axiální rychlost** – Tato rychlost nabývá stejného řádu jako povrchová rychlost na vstupu do separační komory. Axiální tok směřuje nejdříve dolů v blízkosti stěn do místa obrácení směru víru a dále postupuje nahoru k výstupní trubici v centrální zóně cyklonu [40]. Axiální rychlost, jež umožňuje transport částic směrem dolů do sběrné sekce, působící na dispergovanou fázi v blízkosti stěny

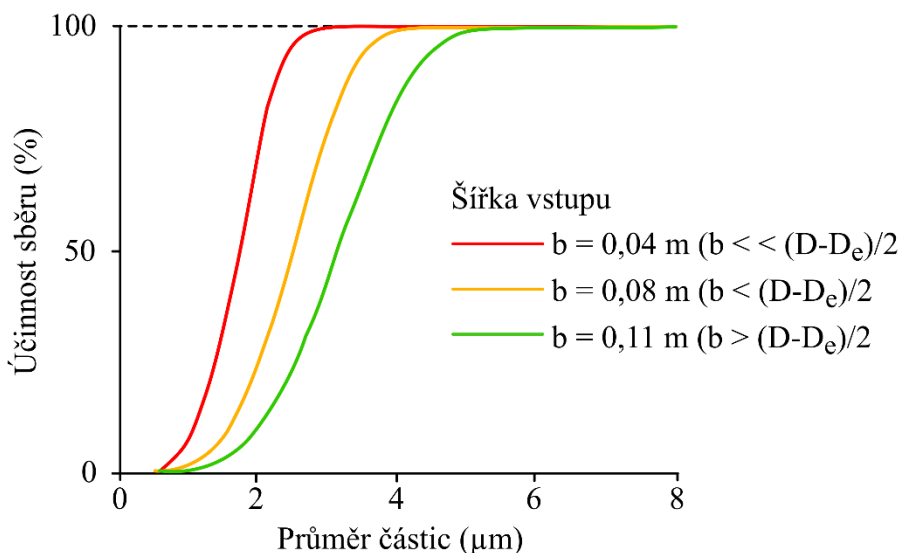
je mnohem dominantnější než gravitační síla. Snížení průměru výstupní trubky vede ke zvýšení této rychlosti ve vnitřním víru a vice versa [44].

- **Radiální rychlost** – Typicky je nejnižší složkou celkové rychlosti a téměř neměnná po celé výšce separátoru. Výjimka vzniká v oblasti prosakování na výstupní trubce, kde dosahuje nejvyšší rychlosti účinkem sekundárních toků [40]. Jedná se o jeden z důvodů neideální separace a typického tvaru křivky frakční účinnosti v podobě písmene S [41].

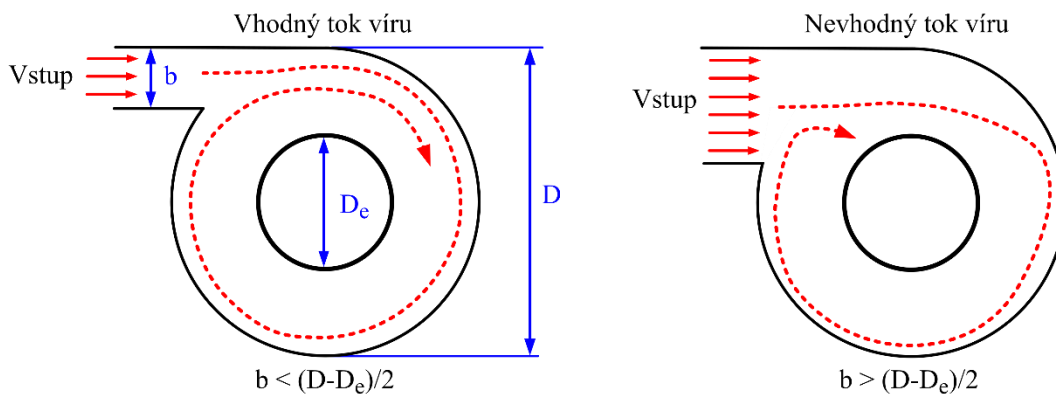
3.7 Vliv geometrie na výkon cyklonu

Celkový výkon cyklonového separátoru, jenž sestává zejména z tlakové ztráty a účinnosti zachycení kapek z nosného plynu, ovlivňují různé geometrické parametry [33]. Odmlžovač se obecně skládá ze čtyř hlavních částí, a to ze vstupu, válcové komory, kuželové části a výstupní trubky [45].

- **Geometrie vstupu** – Vstupní rozměry mají vliv na maximální rychlost plynu a tlakovou ztrátu v cyklonu, které klesají s narůstající velikostí šířky a výšky vstupu. Nárůst rozměrů současně také snižuje účinnost separace menších částic. Přičemž změna šířky na účinnost separace je mnohem významnější než změna výšky vstupu. Optimální poměr šířka/výška vstupu se může nacházet v rozsahu 0,5–0,7 [38]. Na obr. 21 je prezentována závislost šířky vstupu na frakční účinnosti odlučovače a obr. 22 ukazuje vliv šířky vstupu na změnu proudění média, kdy typ proudění na obrázku vlevo snižuje počet efektivních otáček v cyklonu a vede k nižší separaci [46].

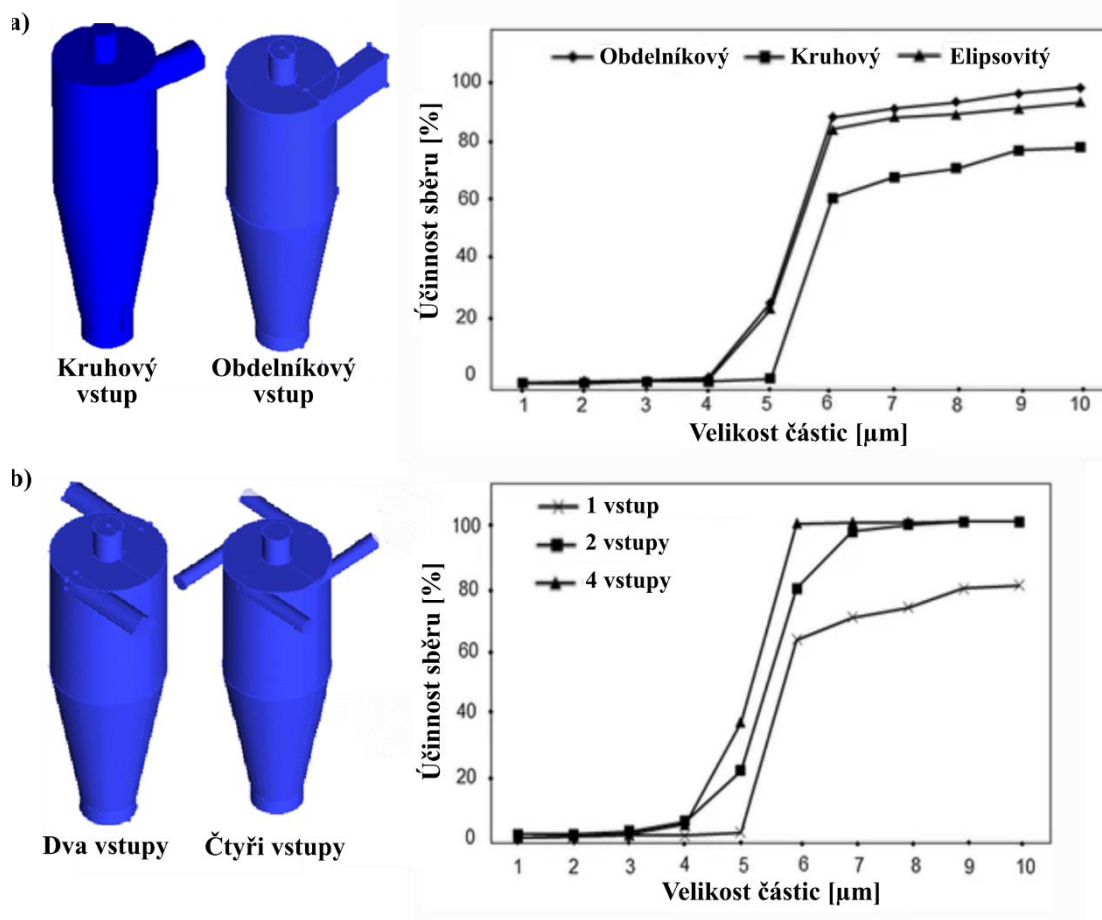


obr. 21: Změna účinnosti v závislosti na šířce vstupního kanálu, upraveno [46]



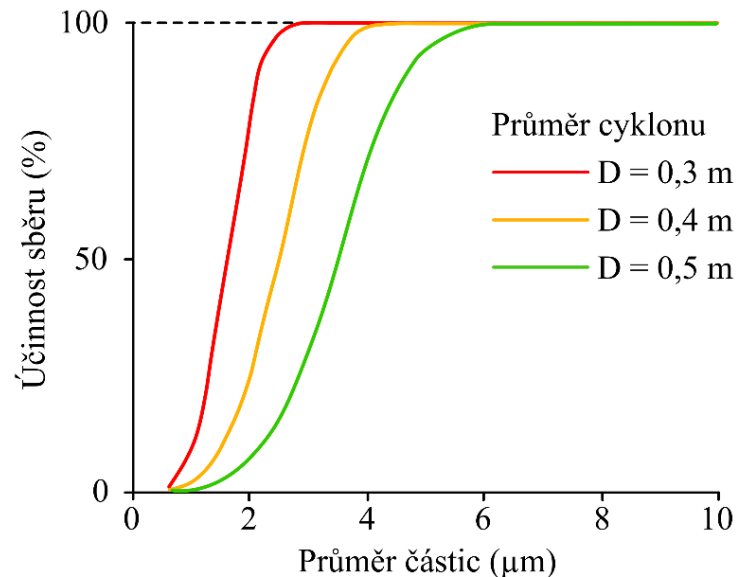
obr. 22: Vzor proudění pro dvě různé šířky vstupu do cyklonu

Na základě počítačových simulací byl zjištěn vliv samotného tvaru vstupu na odlučivost. Tedy účinnost sběru pro obdélníkový vstup dosahuje lepších výsledků separace než elipsovité otvor a nejnižší schopnost separace vykazuje proudění plynu kruhovým vstupem viz obr. 23a. Na druhou stranu tlakový spád u kruhového otvoru vykazuje nejnižší hodnoty. Numerické simulace také ukazují, že při využití dvou nebo čtyř rovnoměrně uspořádaných vstupů vede k výrazně lepší účinnosti sběru než jeden stejně rozměrný vstup, přičemž čtyři přívodní potrubí jsou výhodnější než dvě viz obr. 23b [47].



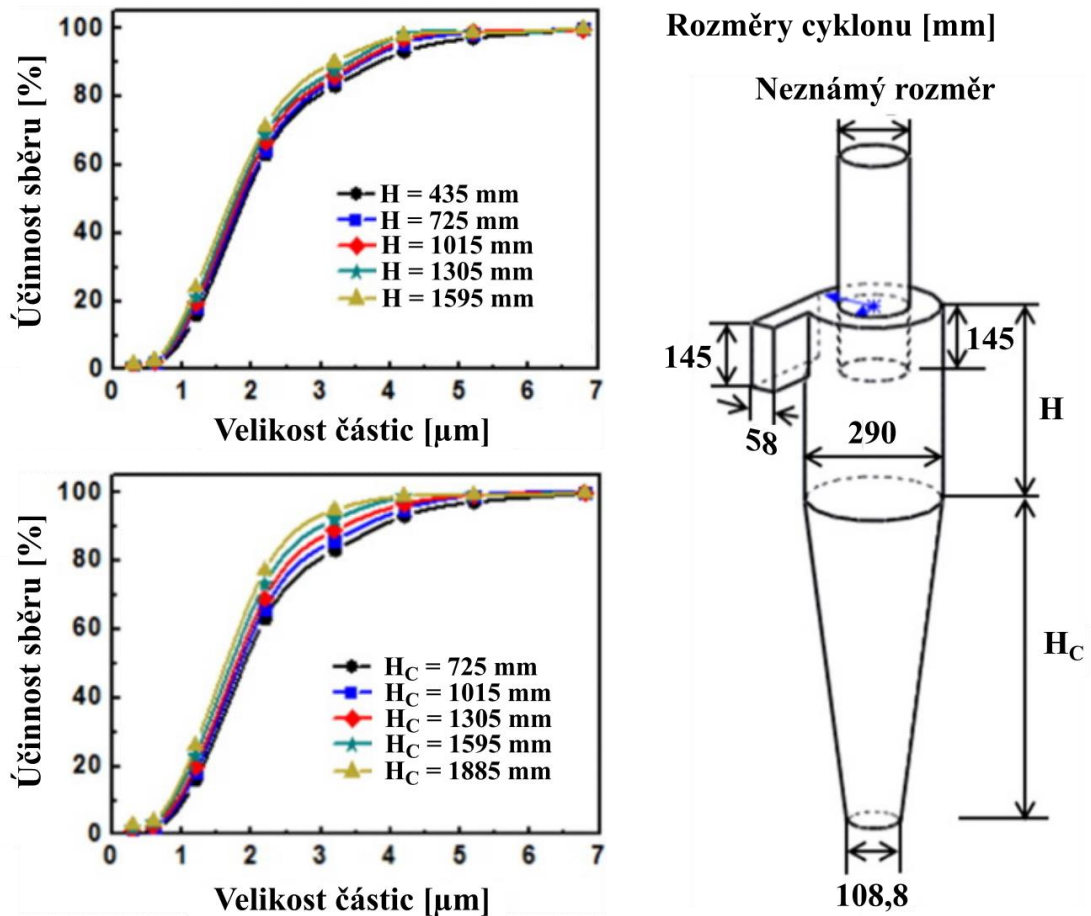
obr. 23: Vliv tvaru a počtu vstupů na účinnost separace, upraveno [47]

- **Průměr válcové části** - Velikost průměru separační komory definuje, jak velké částice budou separovány. Oddělení větších částic vyžaduje větší průměr válce, tím se současně zvětšuje poloměr vnějšího víru, ze kterého jsou částice separovány. Důvodem je snaha zabránit vzniku nadměrných nežádoucích turbulencí uvnitř komory. S velikostí průměru se musí aplikovat i vyšší vstupní rychlost. Šířka komory řídí velikost tangenciální složky rychlosti plynu [48]. Tedy větší průměr znamená nižší účinnost odloučení částic v důsledku poklesu odstředivé síly viz obr. 24 [46].



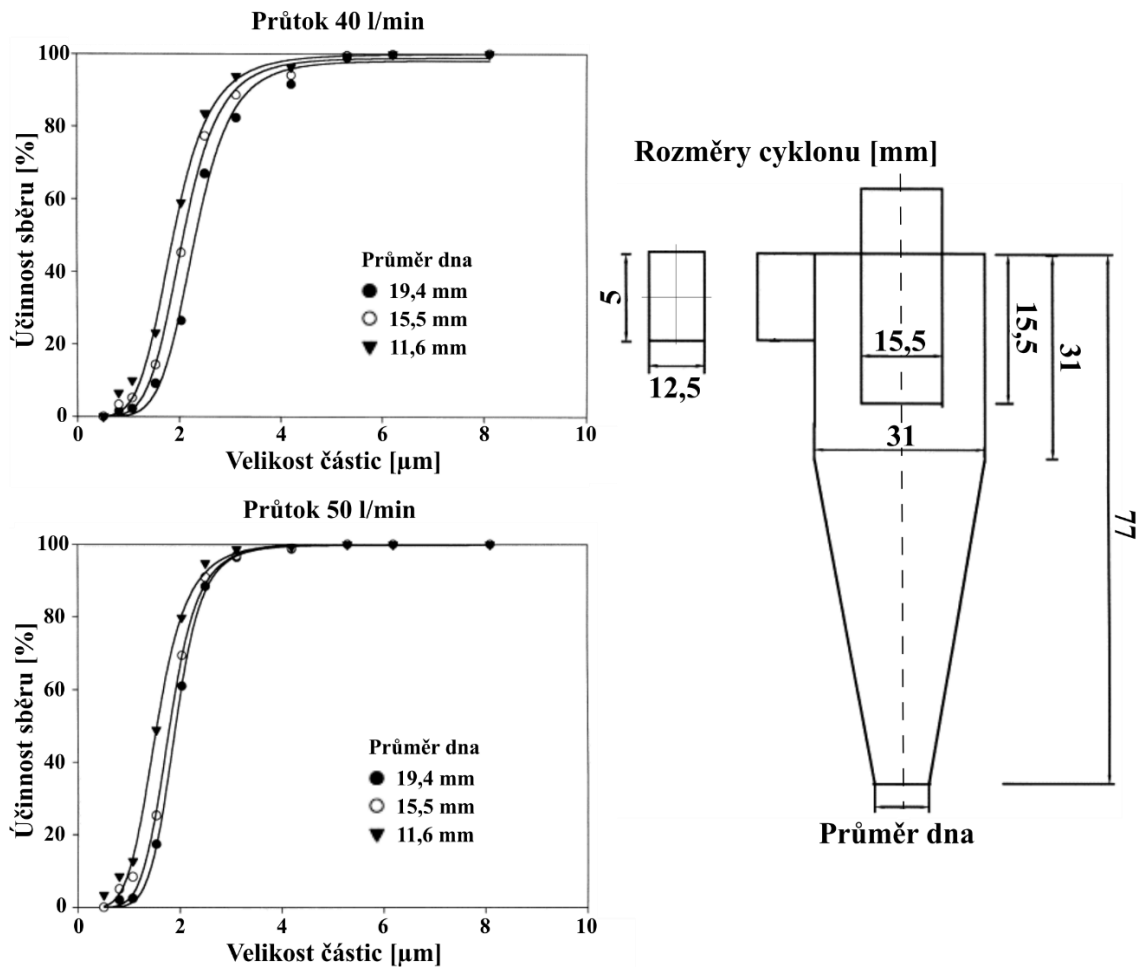
obr. 24: Predikce účinnosti v závislosti na průměru cyklonu, upraveno [46]

- **Výška separační komory** – Při zachování vstupních a výstupních rozměrů lze zvýšit pravděpodobnost zachycení kapek prodloužením délky těla cyklonu viz obr. 25, čímž tedy naroste objem vnějšího víru a retenční doba. Zlepšení účinnosti touto úpravou má své limity. Relativní délkový poměr (celková délka cyklonu/průměr válce cyklonu) nad hodnotu 5 z ekonomického hlediska není již výhodný [28]. Radiální složka rychlosti proudícího média je proměnlivá v závislosti na výšce těla cyklonu [48]. S narůstající výškou postupně klesá maximální rychlost plynu [49]. Na základě numerické simulace bylo prokázáno, že zvětšení délky válcové nebo kuželové části komory vede ke snížení tlakové ztráty a zvýšení účinnosti separace částic, což je doprovázeno snížením intenzity turbulence. Válec má při této změně délky výraznější pokles tlaku a mírnější zvýšení účinnosti ve srovnání s konickou zónou cyklonu. Nízké hodnoty vstupní rychlosti plynu vedou na efektivní snížení tlakové ztráty a naopak [50].



obr. 25: Vliv změny délky válcové a kuželové části separační komory na účinnost sběru, upraveno [50]

- **Průměr dna kužele** – Účinnost zachycení částic narůstá se snižujícím se průměrem otvoru ve spodní části kužele. Tangenciální rychlost je proměnná v závislosti na průměru, tedy s postupně zmenšující se plochou průřezu kužele jsou částice více urychlovány a působí na ně větší odstředivá síla viz obr. 26. Avšak minimální rozměr dna je omezen na hodnotu průměru výstupní trubky, která by neměla být překročena. Pokud tato hranice bude dodržena, pokles tlaku při změně průměru kužele nebude významný. Pravděpodobnost kontaktu víru se stěnou kužele narůstá se zmenšujícím otvorem pro odvod zachycených částic. Výsledkem této kolize je snížení účinnosti cyklonu [34].



obr. 26: Vliv rychlosti a průměru dna kužele na účinnost zachycení částic, upraveno [34]

- **Rozměry výstupní trubky** – V případě kruhového výstupu obecně platí, že čím větší je průměr výstupní trubky, tím nižší tlakové ztráty lze dosáhnout za cenu nižší účinnosti eliminace částic [33]. Menší průměr trubky má za následek zvýšení tangenciální rychlosti, tedy je dosaženo vyšší odlučivosti částic. Dle výsledků počítačové simulace je precese vnitřního víru proměnná v závislosti na průměru výstupní trubky, tedy menší průměr znamená vyšší precese a naopak [44]. Účinnost odloučení větších kapek narůstá s klesající délkou výstupní trubky, zatímco pravděpodobnost zachycení jemných kapiček klesá [33]. Hloubka zasunutí výstupní trubky má mírný vliv na tlakový spád cyklonu, tedy čím hlouběji se zapustí trubka do kuželové části cyklonu, tím vyšší pokles tlaku bude vyvíjen [31].

Konečnou maximální velikost odstředivého separátoru omezují náklady spojené s jeho výstavbou. Docílit lepší účinnosti cyklonu s nízkou rychlostí průtoku plynu lze provést zmenšením vstupních rozměrů, což ale může způsobit omezení flexibility zařízení. Výhodnější variantou pro zlepšení účinnosti může být použití více malých cyklonů zapojených paralelně místo jednoho velkého. Celkový tok plynu bude rovnoměrně rozložen mezi jednotlivé separátory, jejichž výsledné zatížení bude téměř totožné. Přičemž konzistentní úroveň účinnosti bude zachována [48].

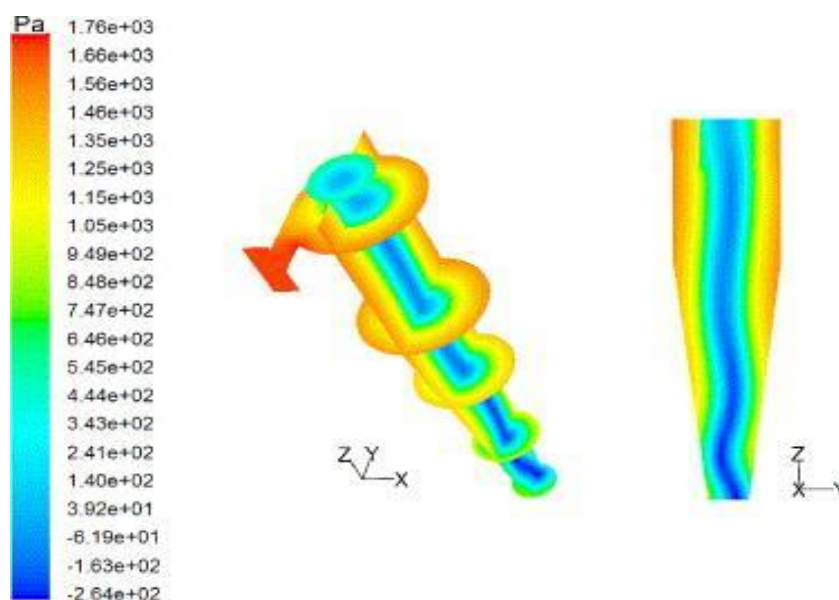
Účinnost eliminace malých kapiček může být zvýšena rozstříknutím kapaliny v podobě větších kapek do proudu plynu na vstupu cyklonu. Tyto částice se následně budou srážet a vlivem koalescence slučovat s menšími kapičkami za vzniku velkých kapek, jenž se snadněji odseparují za působení odstředivé síly. Rozstříkování kapaliny protiproudě s plynem umožňuje jejich maximální kontakt, tím se získá nejvyšší účinnosti procesu [8].

3.8 Výkon cyklonu

Při konstrukci odstředivého separátoru se tradičně musí vzít v úvahu jeho celkový výkon, jenž se skládá z účinnosti zachycených částic a tlakových ztrát. Obě výkonnostní kritéria jsou spolu úzce spojena [45]. U cyklonu se vždy požaduje minimální možný tlakový úbytek a maximální schopnost odlučivosti částic. Dosáhnout vysoké účinnosti sběru lze při vysokých hodnotách tangenciální rychlosti proudící směsi za vzniku vyšší tlakové ztráty napříč celým cyklonem. V opačné situaci, kdy se minimalizuje tento tlakový spád, poklesne účinnost zachycení částic. Tedy mezi tlakovým úbytkem a odlučivostí se musí udělat kompromis, ačkoli v praxi je vyšší prioritou účinnost sběru cyklonu než jeho pokles tlaku [44].

3.8.1 Teorie tlakové ztráty

Důležitým faktorem, jenž se musí tedy vzít v úvahu, při pořízení odstředivého separátoru je velikost tlakové ztráty. S úbytkem tlaku narůstají náklady na energii potřebnou pro dosažení vhodného průtoku plynu skrze jednotku. Na druhou stranu větší tlaková ztráta obvykle zlepšuje účinnost separace částic [48]. Následující obr. 27 prezentuje rozložení statického tlaku za použití cyklonu typu Stairmand při vstupní rychlosti 20 m/s a teplotě 293 K s využitím počítačové simulace [51].



obr. 27: Mapa statického tlaku v Stairmand cyklonu, upraveno [51]

Přibližně 80 % z celkové tlakové ztráty uvnitř cyklonu vzniká v důsledku disipace energie viskózním napětím vířivého proudění tekutiny, zatímco zbylých 20 % je generováno expanzí na vstupu, třením plynu o stěny separační komory a kontrakcí plynu na výstupu [51].

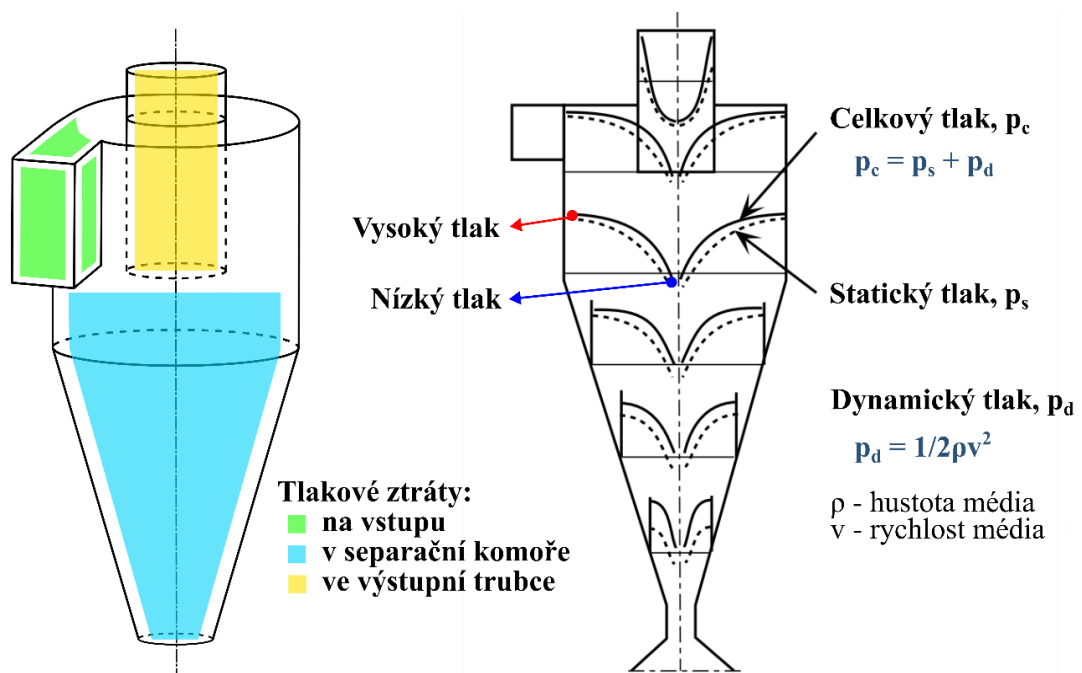
Úbytek tlaku se obecně vztahuje k úbytku celkového tlaku, jenž sestává z tlaku dynamického a statického. Tedy jedná se o ztrátu tlaku generovanou během průtoku plynu mezi vstupem a výstupem. V důsledku přítomného víření plynu na výstupu lze měření poklesu tlaku realizovat jen obtížně. Měřit dynamický tlak na výstupu může být experimentálně mnohem náročnější než měření statického tlaku [49]. Celkový úbytek tlaku separátoru sestává ze dvou hlavních typů ztrát. Jedná se o místní ztráty, jež souvisí se setrvačností, a ztráty třecí [48].

- **Místní ztráty** vznikají v důsledku expanze plynu na vstupu do komory a v místě, kde plyn ve vířivém proudu přechází do kuželové části cyklonu [48].
- **Ztráty třením** jsou vyvíjeny třením mezi vířivým pohybem plynu a stěnou separátoru a při kontaktu proudu plynu s výstupní trubicí [48].

Obecně tedy generované tlakové ztráty napříč odstředivým separátorem lze kategorizovat do tří následujících sekcí viz obr. 28 vlevo [49].

- Ztráty na vstupu plynu
- Ztráty v separační komoře
- Ztráty ve výstupní trubce

Pokud odstředivý separátor bude vybaven tangenciálním vstupem, lze zanedbat vstupní ztráty v důsledku laminárního proudění. V okamžiku, kdy plyn vstoupí do komory odlučovače, se laminární proudění přemění na vířivý proud plynu vlivem geometrie separační komory. Odpovídajícím způsobem tedy naroste dynamický tlak, který následně poklesne během tření plynu o stěnu. Tyto tlakové ztráty jsou výrazně vyšší ve srovnání s úbytkem tlaku ve výstupní trubce [49]. Na celkové tlakové spád zařízení mají největší vliv ztráty způsobené vířením proudu plynu a vyvolané kónickou částí cyklonu [48].



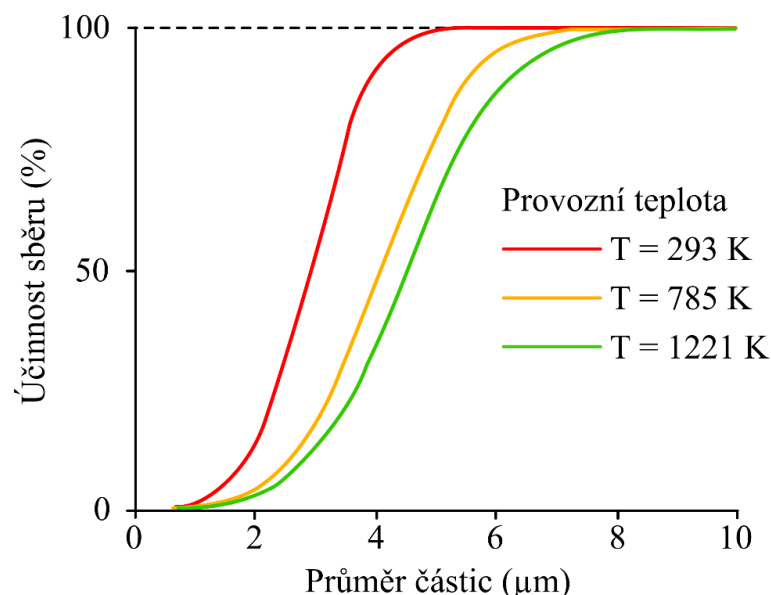
obr. 28: Oblasti poklesu tlaku (vlevo) a rozložení statického a celkového tlaku v cyklonu (vpravo), upraveno [29]

Tedy tlaková ztráta vzniká mezi vstupem plynu a výstupní trubkou a mezi vstupem a výstupem kapaliny. Obě tlakové ztráty rostou se zvyšujícím se množstvím plynu, stejně jako jejich míra nárůstu. Proud plynu vstupující do separační komory se otáčí vysokou rychlostí, která se zachovává i v blízkosti výstupu kapalné fáze. Zde se tedy generuje dynamický tlak dosahující vyšších hodnot než tlak statický. Ve výstupní trubce se rotační proudění zpomaluje a klesá dynamický tlak za jeho transformace na tlak statický viz obr. 28 vpravo. Výsledkem tedy je vyšší pokles tlaku v místě výstupu odloučené složky ve srovnání s úbytkem tlaku na výstupu fáze kontinuální [52].

V případě prstencového toku směsi plyn–kapalina potrubím je tlakový spád v určitém úseku vyšší než pokles tlaku u samostatného plynu. S nárůstem zatížení nosného média kapalinou roste velmi rychle tlaková ztráta až na hodnotu 0,1 kg kapaliny na kg plynu, pak dochází k rychlému vyrovnání nárůstu tlakové ztráty. Obdobná situace je v cyklonovém odlučovači, kdy kapalný film na stěně válce generuje největší úbytek tlaku. V této situaci má na zvýšení tlakové ztráty vliv i míra drsnosti stěny tvořena vlnami kapaliny, které vykazují poměrně velkou hydraulickou drsnost [29].

Zvýšení koncentrace kapalného úletu v nosném plynu při stejném průtoku významně nezvyšuje ani nesnižuje tlakový spád pro maximální požadovanou účinnost separace v cyklonovém odlučovači [52].

Úbytek tlaku také ovlivňují fyzikální vlastnosti tekutin. Viskozita a hustota kapaliny se výrazně nemění s tlakem a teplotou, na druhou stranu viskozita a hustota plynu se mění již významně. Obě vlastnosti tekutin narůstají při zvýšení tlaku a teploty. Tlaková ztráta se zvyšuje za vyšších hodnot hustoty plynu a viskozita se zvyšuje s teplotou systému. Výsledkem je snížení separační účinnosti cyklonu [25]. Vliv teploty na frakční odlučivost ilustruje obr. 29 [46].



obr. 29: Vliv provozní teploty na účinnost separace, upraveno [46]

Přestože bylo publikováno mnoho rovnic pro tlakovou ztrátu v systému, žádné z nich nejsou plně spolehlivé. Částečně je to způsobeno tím, že neexistuje standardní geometrie cyklonu. Pokles tlaku ovlivňuje zejména hustota a objemový průtok plynu a geometrie

separátoru [8]. Odhady tlakových ztrát odstředivých separátorů, jenž mají složitou geometrii, se obvykle získávají jen pomocí numerické simulace nebo experimentálních metod [32].

3.8.2 Výpočet tlakové ztráty

Tlakovou ztrátu cyklonového odlučovače lze predikovat na základě empirických a teoretických modelů od různých autorů, některé jsou definovány níže viz rov. (3-6). Obecně platí přímá úměrnost mezi tlakovým spádem a dynamickým tlakem uvnitř cyklonu [53]. Často se míra poklesu tlaku napříč cyklonem popisuje bezrozměrným parametrem zvaným „Eulerovo číslo“ viz rov. (1), z něhož lze následně dopočítat tlakovou ztrátu [29]. Tyto čtyři modely předpokládají celkový pokles tlaku roven úbytku tlaku statického, případně jako funkci geometrie a bezrozměrného parametru [51].

$$Eu = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho_g v_{in}^2} \quad (1)$$

$$v_{in} = \frac{Q}{A_{in}} \quad (2)$$

kde Δp - tlaková ztráta [Pa]

ρ_g - hustota plynu [kg/m³]

v_{in} - vstupní rychlost do cyklonu [m/s] viz rov. (2)

Q - objemový průtok napříč cyklonem [m³/s]

A_{in} - plocha vstupního průřezu [m²]

První tři modely se získaly na základě empirických výzkumů.

- Shepherd & Lapple (1939)

$$Eu = 16 \frac{A_{in}}{D_e^2} \quad (3)$$

- Casal & Martinez-Benet (1983)

$$Eu = 3,33 + 11,3 \left(\frac{A_{in}}{D_e^2} \right)^2 \quad (4)$$

- Coker (1993)

$$Eu = 9,47 \frac{A_{in}}{D_e^2} \quad (5)$$

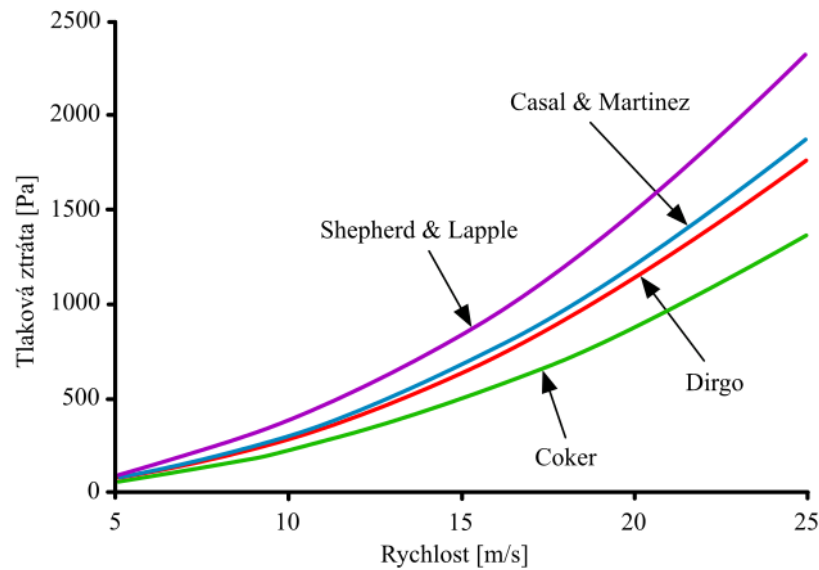
Následující model je na bázi výzkumu teoretického.

- Dirgo (1988)

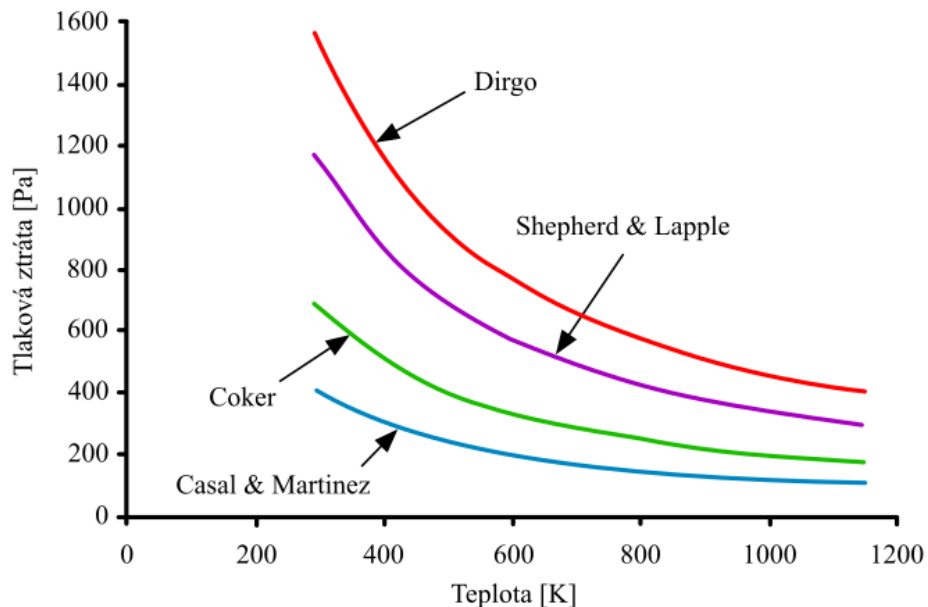
$$Eu = 20 \left(\frac{A_{in}}{D_e^2} \right) + \left[\frac{\frac{S}{D}}{\frac{H}{D} \cdot \frac{h}{D} \cdot \frac{B_e}{D}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

kde D_e , D , H , S , h a B_e – rozměry odlučovače dle obr. 34.

Závislost tlakového spádu na vstupní rychlosti pro čtyři uvedené modely za použití Stairmand cyklonu při tlaku 1 bar, teplotě 293 K a průměru cyklonu 0,305 m lze vidět na obr. 30. Obrázek také ukazuje, že tlaková ztráta narůstá společně s rychlostí a naopak. Dále obr. 31 prezentuje závislost tlakového úbytku na teplotě pro výše zmíněné modely za použití cyklonu typu Bohnet (geometrie viz tab. 1) při průtoku média 100 m³/h, teplotě 293–1123 K a průměru cyklonu 0,150 m. Lze si povšimnout poklesu tlakové ztráty se zvyšující se teplotou [51].



obr. 30: Závislost tlakového spádu na vstupní rychlosti, upraveno [51]



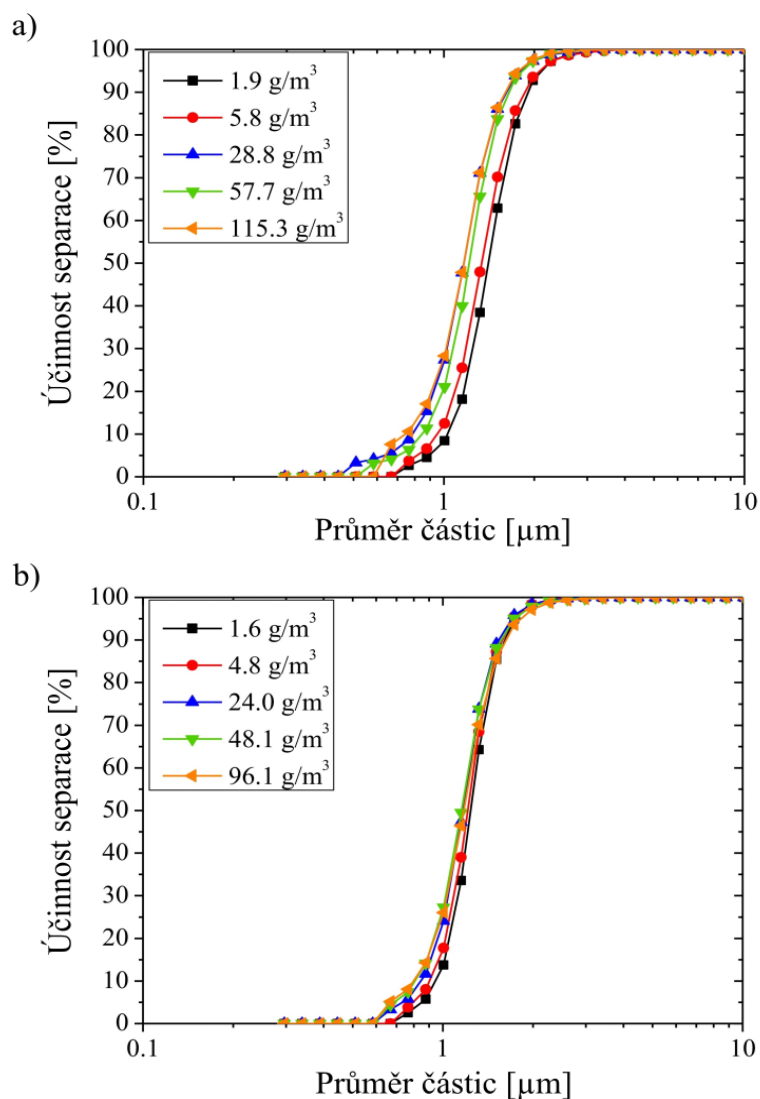
obr. 31: Závislost tlakového spádu na teplotě, geometrie cyklonu Bohnet, upraveno [51]

Kontrolní poměry	D/D	a/D	b/D	S/D	D _c /D	h/D	H/D	B _c /D
Hodnota [-]	1,0	0,533	0,133	0,733	0,333	0,693	2,58	0,333

tab. 1: Geometrie cyklonu Bohnet o průměru 150 mm [51]

3.8.3 Účinnost separace

Schopnost separovat částice z nosného plynu se u odstředivých separátorů vyjadřuje celkovou účinností sběru nebo mezním průměrem částic [50]. Změna průtoku a koncentrace kapiček ovlivňují účinnost separace kapaliny z plynu, proto se musí zajistit dosažení požadované úrovně provozní flexibility, jež v průmyslových výrobních procesech se pohybuje v rozsahu 60–120 %. Účinnost sběru se postupně zvyšuje s nárůstem koncentrace kapiček v plynu za daného průtoku [52]. Na obr. 32 lze vidět nárůst frakční odlučivosti společně s koncentrací částic o hustotě 2900 m³/kg, nejdříve pro vstupní rychlost 15 m/s a pak 18 m/s [54].



obr. 32: Účinnost separace cyklonu v závislosti na koncentraci částic v nosném plynu pro vstupní rychlosti a) 15 m/s a b) 18 m/s, upraveno [54]

- **Celková účinnost sběru** - V cyklonovém odlučovači se uvažují tři frakce, a to přivedené, odloučené a neodloučené množství částic. Hmotnosti či hmotnostní průtoky lze označit symboly M_p , M_o a M_n a jejich bilanci odlučovačem popsat rovnicí (7) [29].

$$M_p = M_o + M_n \quad (7)$$

Účinnost sběru je definována jako poměr hmotnosti všech zachycených částic k celkové hmotnosti částic na vstupu do separační komory cyklonu viz rovnice (8). Případně na místo hmotnosti dispergované fáze může být účinnost zachycení vztažena k počtu částic. Nárůst celkové účinnosti sběru částic znamená snížení mezních průměrů [50].

$$\eta = \frac{M_o}{M_p} = 1 - \frac{M_n}{M_p} = \frac{M_o}{M_o + M_n} \quad (8)$$

Stanovení separační schopnosti se realizuje odběrem vzorků a jejich zvážením. Avšak neposkytuje celkovou účinnost jako funkci velikosti částic, proto není vhodná pro určení vnitřní účinnosti cyklonu v praxi [29].

- **Mezní průměr částic** - Pojem vyjadřuje velikost průměru částice, která má 50% pravděpodobnost zachycení v separačním stupni. Na křivce frakční odlučivosti se označuje jako d_{50} [50]. Většina cyklonů vykazuje hraniční mezní průměr kapek přibližně 3–5 μm , zatímco velikost kapiček v procesních plynech (kromě mlhy) nebývá výrazně vyšší hodnoty [29].

Charakteristiku separace cyklonu lze prezentovat křivkou frakční účinnosti, která popisuje účinnost dané velikosti vstupních částic či jen úzký rozsah velikosti částic. Frakční účinnost lze tedy definovat jako podíl částic ve specifickém rozsahu velikostí, jež jsou účinně eliminovány z nosného plynu [29].

Nesprávně navržená konstrukce cyklonových odlučovačů v důsledku nepřesných předpovědí jejich účinnosti může mít za následek neefektivní separaci částic z nosného média. Vyhodnocení separační účinnosti cyklonu se obvykle uskutečňuje za využití empirických modelů, jenž jsou aplikovatelné pouze pro cyklony s konkrétní geometrií. Empirické modely uvádí různí autoři jako například Lapple, Koch a Licht, Li a Wang a Iozia a Leith. Srovnání jednotlivých modelů pro Stairmand cyklon s vysokou účinností při tlaku 1 bar, teplotě 293 K, vstupní rychlosti 15 m/s a průměru cyklonu 0,305 m lze vidět na obr. 33. Jako příklad pro výpočet frakční účinnosti je níže uveden model Lapple (1951) viz rovnice (9 až 11) [55].

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{50}}{d_i}\right)^2} \quad (9)$$

kde d_{50} a d_i - mezní průměr částice a průměr částice dané frakce [m]

Výpočet mezního průměru dispergované částice:

$$d_{50} = \left[\frac{9vb}{2\pi N v_{in} (\rho_d - \rho_g)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

kde v - kinematická viskozita plynu [m^2/s]

N - počet otáček vnějšího víru [-]

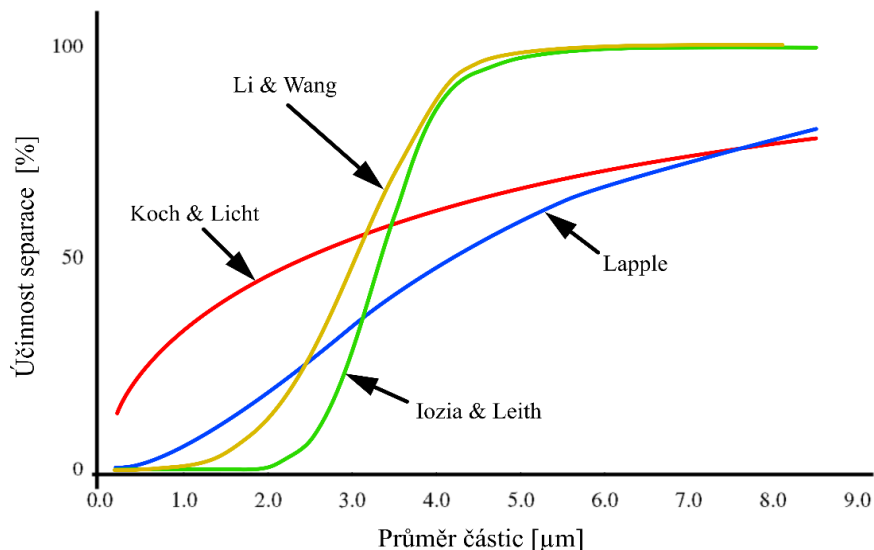
v_{in} - vstupní rychlost plynu [m/s]

ρ_d a ρ_g - hustota dispergované fáze a plynu [kg/m^3]

Výpočet počtu obrátek vnějšího víru uvnitř cyklonu:

$$N = \frac{1}{a} \left[h + \frac{H-h}{2} \right] \quad (11)$$

kde a , H a h - rozměry cyklonu dle obr. 34 [m]



obr. 33: Porovnání čtyř modelů pro frakční odlučivost, upraveno [55]

Výběr vhodného modelu pro predikci separační účinnosti cyklonu lze uskutečnit dle následující tab. 2, jež byla vyhodnocena na základě počítačových simulací v literatuře číslo [55].

Provozní podmínky	Vhodný model
Okolní teplota (293 K) a tlak < 2 bar	Li & Wang
Nízká vstupní rychlost	Koch & Licht
Vysoký tlak	Koch & Licht
Vysoká teplota	Lapple
Vysoký tlak i teplota	Lapple

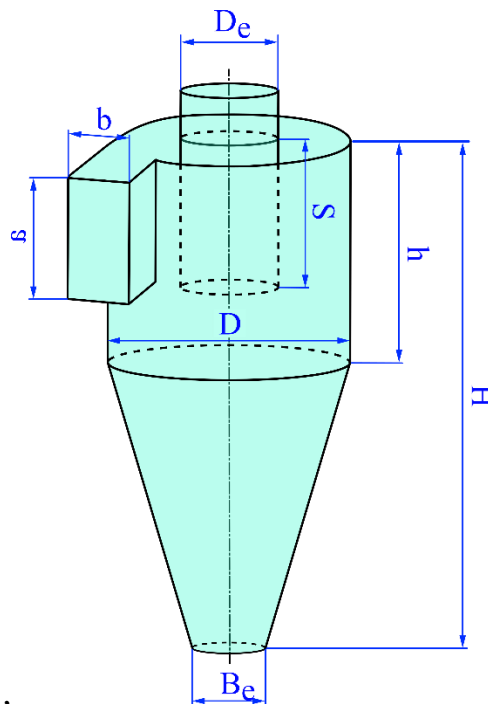
tab. 2: Oblast spolehlivosti modelů pro odhad frakční odlučivosti, upraveno [55]

3.9 Základní geometrie

Cyklon určený pro odloučení kapalné složky z plynu se téměř shoduje s cyklonem, jenž separuje pevné frakce z plynné fáze působením odstředivé síly vyvolané vířením plynu [25]. Rozměry cyklonového odlučovače se pro zjednodušení obvykle uvádí jako bezrozměrný parametr vztažený na průměr válcové části komory cyklonu. Lze tak porovnávat různé konstrukce bez uvažování velikostí každé jednotlivé části. Optimalizované průmyslové cyklony standardních rozměru dle autorů Stairmand, Swift a Lapple, jsou uvedeny v tab. 3. Na základě této tabulky lze tedy dopočítat rozměry cyklonu pro stanovený průměr separační komory. Schéma standardního odlučovače lze vidět na obr. 34 [56].

	Vysoká účinnost		Obecný účel		Vysoký průtok	
	Stairmand	Swift	Lapple	Swift	Stairmand	Swift
D/D	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
a/D	0,5	0,44	0,5	0,5	0,75	0,8
b/D	0,2	0,21	0,25	0,25	0,375	0,35
S/D	0,5	0,5	0,625	0,6	0,875	0,85
D _e /D	0,5	0,4	0,5	0,5	0,75	0,75
h/D	1,5	1,4	1,0	1,75	1,5	1,7
H/D	4,0	3,9	4,0	3,75	4,0	3,7
B _e /D	0,375	0,4	0,25	0,4	0,375	0,4

tab. 3: Geometrie standardních cyklonových odlučovačů, upraveno [56]



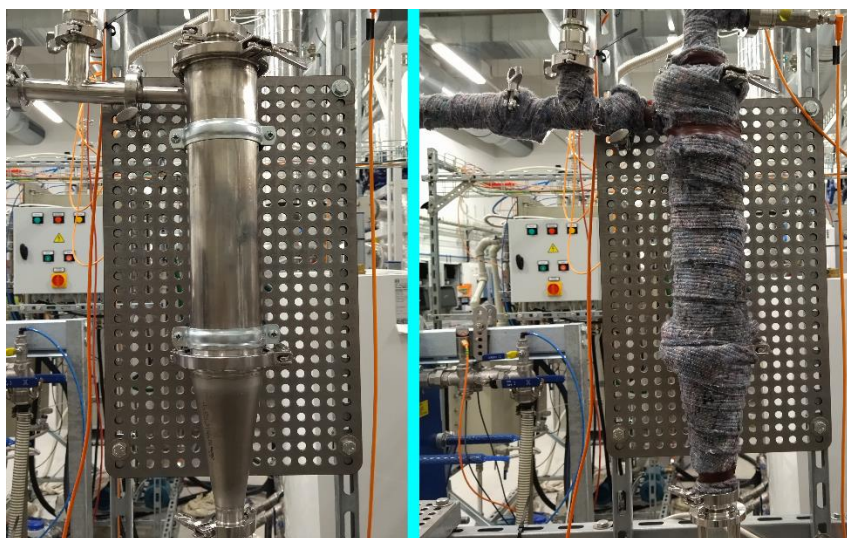
obr. 34: Základní dimenze standardního cyklonu, upraveno [56]

4 Experimentální ověření testovacího cyklonu

Tato kapitola se zaměřuje na ověření použitelnosti cyklonového zařízení pro eliminaci kapalného úletu, jenž je generován v odparce, z proudu brýdových par. Za využití plánovaného experimentu - DOE bude zkoumána zejména účinnost odmlžování a tlaková ztráta napříč cyklonem v závislosti na změně znečištění páry a jejího průtoku na vstupu do cyklonu. Získaná data budou analyzována za použití softwaru Microsoft Excel a statistického softwaru Minitab a porovnána s teoretickými předpoklady. V závěru kapitoly bude navržen upgrade daného cyklonu za účelem zvýšení odlučivosti na základě získaných znalostí v rešeršní části této práce. Samotný experiment bude realizován na slané vodě.

4.1 Geometrie testovacího cyklonu

Cyklon, na němž probíhalo testování separace kapaliny z proudu brýdové páry, lze vidět na obr. 35 níže. Respektive se jedná o původně navržený hydrocyklon, který tedy byl ověřován pro funkci odmlžování.



obr. 35: Testovací cyklon

Geometrie zkušebního cyklonu pro odmlžování prezentuje níže tab. 4 a jeho kontrolní poměry uvádí tab. 5. Ve srovnání se standardními plynovými cyklony uvedených v tab. 3 předchozí kapitoly nenabývá testovací zařízení podobnosti, ale spíše se výrazně odlišuje. Zejména celková délka experimentálního separátoru je významně větší a cyklon má mimo jiné vstup kruhového tvaru, což je pro odstraňování částic z plynu atypické. Vstupní hrdlo má horizontální sklon 5° a ve vzdálenosti 50 mm od těla cyklonu plynulou prudkou redukci v podobě kužele z vnitřního průměru 17,3 mm na 16 mm.

Rozměr	D	d	S	D_e	h	H	B_e
Hodnota [mm]	83,7	16	67	28,5	340	525	16

tab. 4: Geometrie testovacího cyklonu

Kde parametr d uvádí vnitřní průměr vstupní trubky, ostatní rozměry dle obr. 34.

Kontrolní poměry	D/D	d/D	S/D	D_e/D	h/D	H/D	B_e/D
Hodnota [-]	1,0	0,19	0,8	0,34	4,06	6,27	0,19

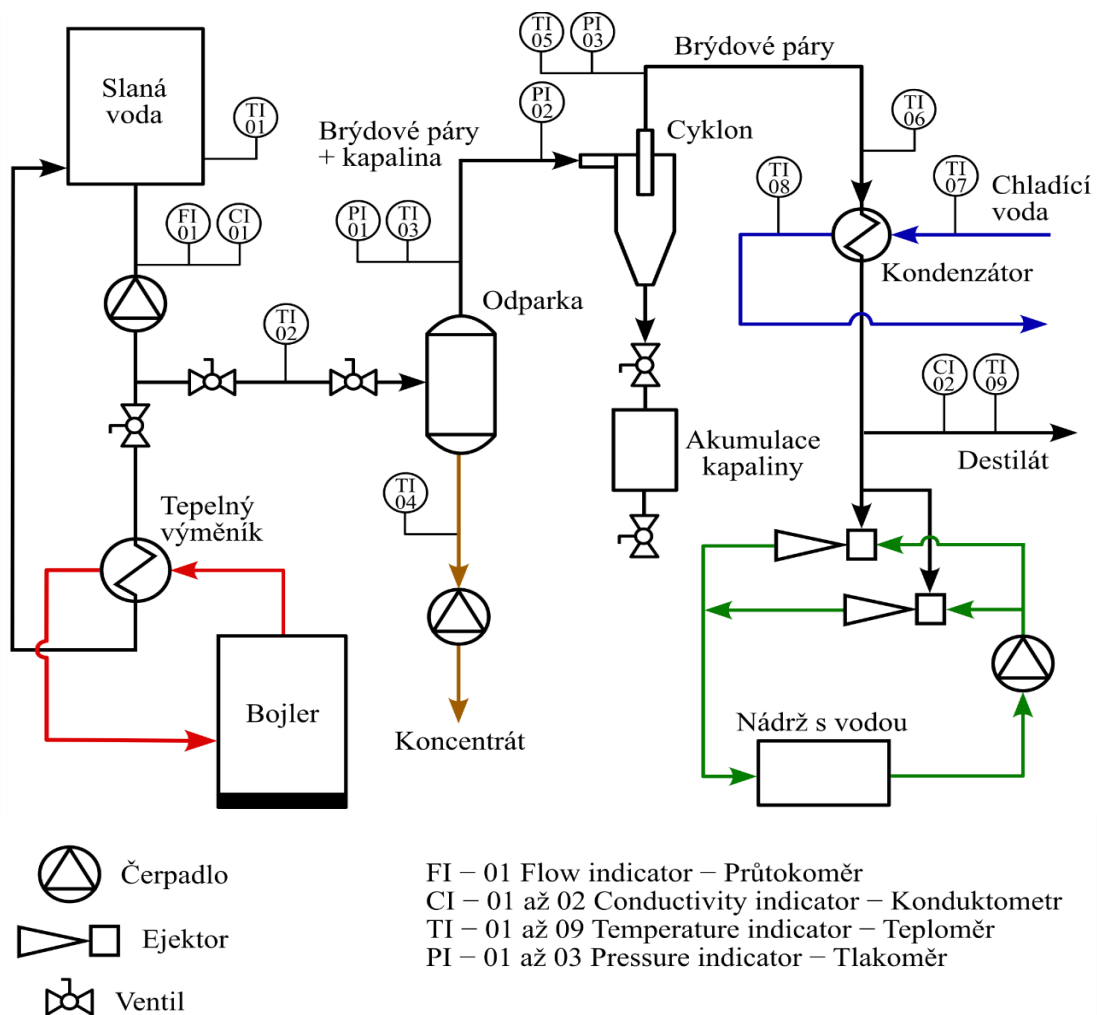
tab. 5: Kontrolní poměry testovacího cyklonu

4.2 Popis procesu s testovacím zařízením

Procesní zařízení bylo sestaveno za účelem experimentálního ověření výkonu cyklonového odlučovače s danou geometrií pro separaci kapaliny z proudu páry za různých provozních podmínek. Aparatura byla zhotovena na základě dostupných zařízení a komponent v Laboratoři energeticky náročných procesů, která je součástí NETME Centre při Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně.

4.2.1 Popis procesu a experimentální aparatury

Následující obr. 36 prezentuje integraci procesu s příslušnými zařízeními, zásobníky a měřicí výbavou.



obr. 36: Schéma procesní aparatury pro ověření cyklonu

Slaná voda je z nádrže nejprve recirkulována čerpadlem přes deskový výměník tepla za účelem ohřátí na požadovanou teplotu. Ohřevným médiem výměníku je voda přiváděná z elektrického bojleru, která po předání tepelné energie cirkuluje zpět do zásobníku ohřívače vody. Po dosažení cílové teploty se dopravuje roztok skrze regulační jehličkový ventil do odparky, kde bude vystaven vakuu. Snížený tlak způsobí ochlazení roztoku a jeho částečný mžikový odpar. Proud generované brýdové páry se strženou kapalinou v podobě kapiček je odváděn horním potrubím do cyklonového odlučovače, zatímco druhý proud v podobě koncentrátu se pomocí čerpadla odčerpává do kanálu. V cyklonovém separátoru bude směs pára–kapalina vystavena silnému vířivému proudění, přičemž bude docházet k odloučení kapalného úletu od proudu páry působením vysoké odstředivé síly. Odseparovaná kapalina bude akumulována v malém zásobníku umístěném pod cyklonem a horní výstupní trubkou cyklonu bude čistá pára odváděna potrubím do deskového kondenzátoru, kde zkondenzuje za vzniku destilátu vlivem proudění chladicí vody. Destilovaná voda je akumulována v otevřeném zásobníku za využití pneumatického membránového čerpadla (není zaznačeno ve schématu), které se zapne automaticky za využití hladinoměru situovaného na vstupní větvi. Tedy ve chvíli, kdy potrubí bude dostatečně zaplněno destilátem, spustí se membránové čerpadlo, které pomocí tlakového vzduchu vytlačí destilovanou vodu do zásobníku.



obr. 37: Vakuová odparka

Nasávání generované brýdové páry z odparky přes cyklon do kondenzátoru a odsávání kondenzátu se realizuje za použití dvou paralelně zapojených ejektorů, jenž také udržují požadovaný podtlak v systému. Aplikované ejektory využívají kinetickou energii proudící vysokotlaké vody recirkulované čerpadlem napříč nádrží s vodou. Odmlžovací cyklon v tomto uspořádání pracuje tedy v podtlaku a pára produkovaná odparkou je do cyklonu nasávána.

Únik tepelných ztrát do okolí byl omezen tepelnou izolační vrstvou typu instalatérská bandáž, respektive izolační plstěný pás, jenž byl postupně omotán na samotný cyklon a odparku a na jejich propojovací potrubí, jak je vidět i na obr. 37.

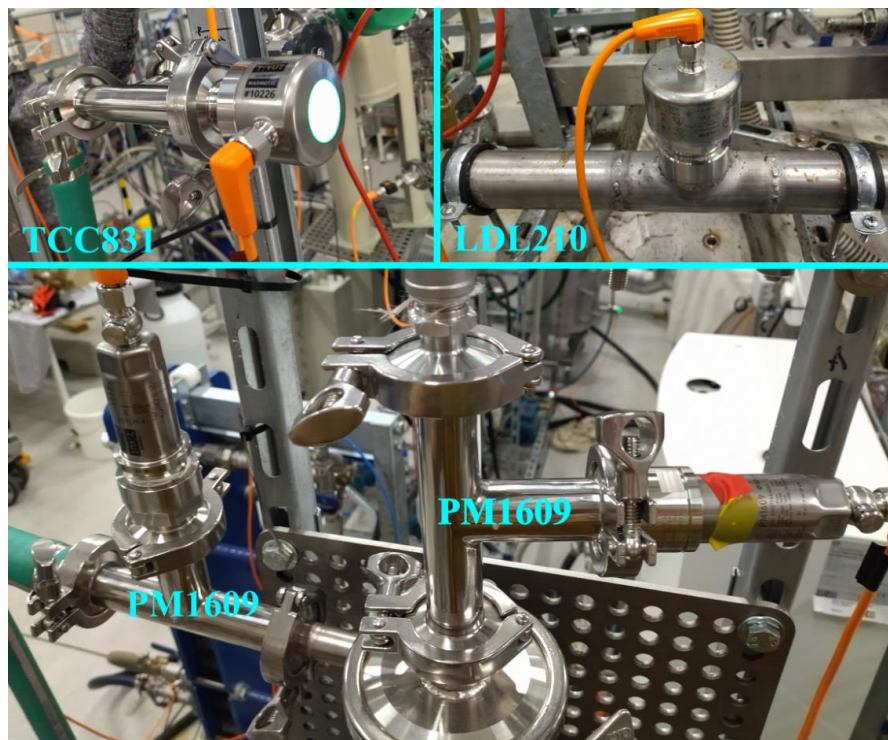
4.2.2 Měřicí vybavení

Na příslušných místech potrubní sítě testovací aparatury je umístěno měřicí vybavení pro sledování a zaznamenávání klíčových provozních parametrů, tj. průtoku, konduktivity, tlaku a teploty viz obr. 36. Příklad použitého vybavení shrnuje tab. 6.

Měřidlo	Výrobce	Typ	Rozsah	Jednotky	Přesnost
PI – 01 až 03	ifm electronic	PM1609	–1000 až 1000	mbar	$< \pm 1$
TI – 01 až 03	ifm electronic	TCC831	–25 až 160	°C	± 2
CI – 01	ifm electronic	LDL210	100 až 1 000 000	$\mu\text{S/cm}$	± 25
CI – 02	Smaris	SV60	0 – 20 000	$\mu\text{S/cm}$	–

tab. 6: Měřicí vybavení

Vodivostní sonda SV60 nedokázala spolehlivě měřit salinitu destilátu, to mohlo být způsobeno velmi nízkým průtokem zkondenzované páry.



obr. 38: Měřicí vybavení

4.2.3 Stanovení průtoku a rychlosti páry

Nízký tlak v odparce, respektive podtlak, ztěžuje přímé měření průtoku brýdové páry konvenčními průtokoměry. Proto se hmotnostní průtok stanoví na základě bilanční energetické rov. (12). Rychlost generované páry v odparce a na vstupu do cyklonu lze následně získat dle rov. (13 a 14) [57].

$$m_w \cdot c_p \cdot (T_w - T_v) = m_v \cdot l_v \quad (12)$$

$$v_o = \frac{m_v}{\rho_v \cdot A_o} \quad (13)$$

$$v_{in} \cdot A_{in} = v_o \cdot A_o \quad (14)$$

kde m_w – hmotnostní průtok slané vody [kg/s]
 c_p – měrná tepelná kapacita vody [J.kg⁻¹.K⁻¹]
 T_v – teplota brýdové páry [K]
 T_w – teplota vody [K]
 m_v – hmotnostní průtok páry [kg/s]
 l_v – latentní teplo vypařování [J/kg]
 v_o – je rychlost páry v odparce [m/s]
 ρ_v – hustota páry [kg/m³]
 A_o – plocha průřezu odparky [m²].

4.3 Stanovení kvality vody

Pro stanovení kvality vody se běžně využívají parametry typu elektrická vodivost (EC – Electrical Conductivity) a celkové rozpuštěné pevné látky v roztoku (TDS – Total Dissolved Solids). Obě charakteristické veličiny indikují stupeň salinity a jsou mezi sebou matematicky korelovány dle rov. (15) [58].

$$TDS \left[\frac{mg}{l} \right] = k_f \cdot EC \left[\frac{\mu S}{cm} \right] \quad (15)$$

EC vyjadřuje schopnost kapaliny vést elektrický proud a závisí na koncentraci rozpuštěných iontů, iontové síle a teplotě měření [58]. Konverzní faktor (k_f) tedy závisí na chemickém složení uvažované kapaliny a obecně spadá do rozmezí 0,54–0,96. V případech, kdy není známa přesná velikost faktoru přepočtu EC na TDS, se obvykle aplikuje pro odhad hodnota 0,67 [59]. V tab. 7 jsou uvedeny jako příklad konverzní faktory pro různé druhy vod [58].

Druh vody	EC při 25 °C [μS/cm]	k_f [–]
Přírodní voda	500–3000	0,55–0,75
Destilovaná voda	1–10	0,5
Sladká voda	300–800	0,55
Mořská voda	45 000–60 000	0,7
Solanka	65 000–85 000	0,75

tab. 7: Korelace mezi EC a TDS pro různé druhy vod, upraveno [58].

Přepočet elektrické vodivosti slané vody na salinitu v mg/l lze uskutečnit dle modelu v rov. (16) s konverzním faktorem 0,64, jenž byl odvozen za teploty 25 °C. Vodivost se mění s teplotou, proto je nutné korigovat údaje o salinitě pro danou teplotu, respektive salinita se zvyšuje o 2–3 % s každým stupněm celsia a vice versa [60].

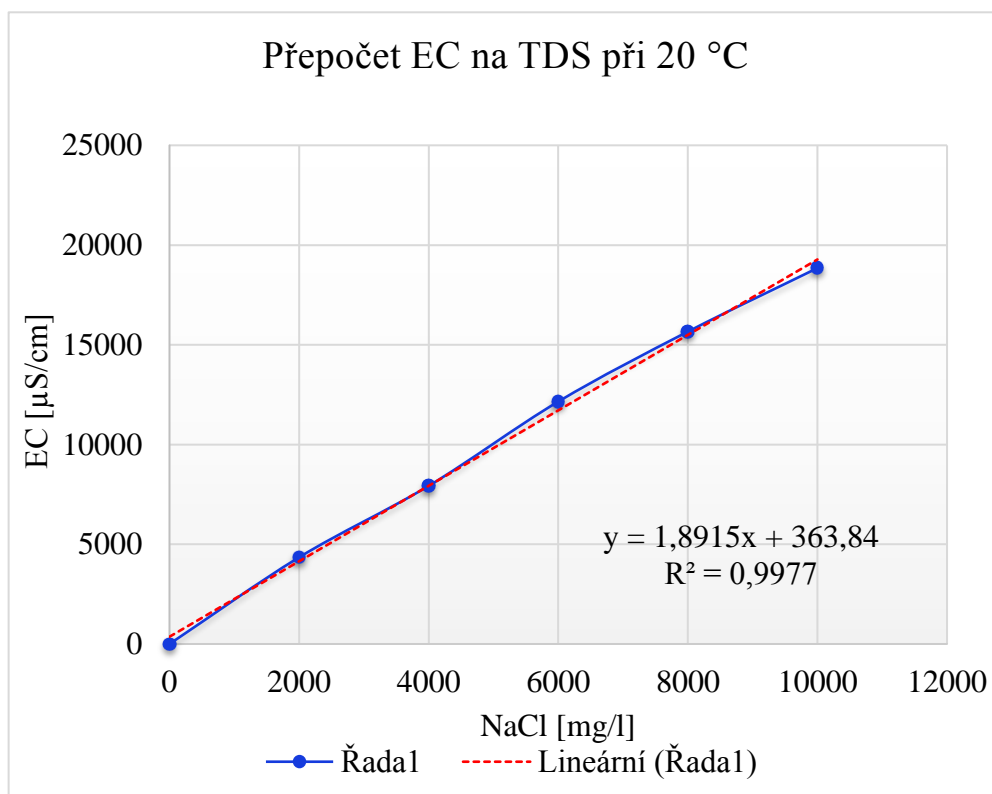
$$TDS = 0,64 \cdot EC \quad (16)$$

Pro konverzi EC na TDS byl vytvořen vlastní empirický model při teplotě roztoku 20 °C následujícím způsobem. Do nádoby byla napuštěna pitná voda o objemu jednoho litru s již existující vodivostí 533 $\mu\text{S}/\text{cm}$, tato hodnota byla odečtena od naměřených salinit. Chlorid sodný byl přidáván do vody v přírůstcích po 2 gramech v rozmezí 2–10 g. Výsledná vodivost byla měřena při každém navýšení koncentrace za využití softwaru Logger Lite, jenž má schopnost vizualizovat a zpracovávat naměřená data, a konduktometru Vernier CON-BTA s přepínatelným rozsahem měření 0–200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 0–2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 0–20 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a přesností 1 % z rozsahu. Získaná data z měření shrnuje níže tab. 8.

NaCl/H ₂ O	[mg/l]	0	2000	4000	6000	8000	10 000
EC	[$\mu\text{S}/\text{cm}$]	0	4344	7926	12152	15659	18847

tab. 8: Změřená závislost EC na TDS

Data z tab. 8 byla zanesena do grafu na obr. 39, kde jsou prezentována modrou křivkou, a proložena lineární spojnicí trendu. Následně byl vygenerován regresní model pro přepočítání EC na TDS, jenž nabývá tedy lineárního charakteru se spolehlivostí 99,77 %.



obr. 39: Model konverze EC na TDS při 20 °C

Získaný model byl využit při experimentu k nastavení požadované salinity vody v nádrži před jednotlivými testy a pro odhad přibližné spotřeby kuchyňské soli, kterou bylo nutné zajistit a jež reprezentovala znečištění vody.

Dále byl stanoven konverzní koeficient, který představuje průměrnou hodnotu poměrů mezi celkovým množstvím rozpuštěné soli ve vodě a elektrickou vodivostí viz rov. (17).

$$TDS = 0,5 \cdot EC \quad (17)$$

Tato rovnice a model na obr. 39 může být použit pro určení přibližné koncentrace TDS na základě změřené elektrické vodivosti vody. Jejich použití je omezeno rozsahem salinity 0–20 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a teplotou vody 20 °C.

4.4 Plánovaný experiment – DOE

Metoda DOE má nezastupitelné místo v průmyslovém odvětví, kde se využívá za účelem optimalizace nejrůznějších výrobních procesů. Jedná se o efektivní a široce používaný nástroj k plánování experimentů a hledání vhodných regresních modelů, které vedou k řešení běžných problémů vyskytujících se v technické praxi. Při daném problému je primárním cílem nalézt skupinu funkcí, jež téměř přesně popisuje vztah mezi vstupní (nezávislou) a výstupní (závislou) proměnnou. DOE umožňuje cílevědomě manipulovat se vstupními faktory k pozorování a identifikaci statisticky významných faktorů a interakcí, jež ovlivňují sledovanou výstupní proměnnou. Pomocí vhodně naplánovaného experimentu lze získat na základě poměrně malého počtu měření velké množství dat o konkrétním procesu. Získané informace se následně využívají ke zlepšení daného procesu [61].

Níže je představena základní terminologie DOE [61].

- **Faktor** - Navrhovaná nezávislá proměnná kvalitativního či kvantitativního typu u níž se zkoumá vliv na odezvu.
- **Odezva** - Měřená nebo pozorovaná proměnná, která závisí na faktorech a náhodných vlivech.
- **Interakce** - Skutečnost, že vliv jednoho faktoru na odezvu může záviset na hodnotě jiného faktoru.
- **Úroveň faktoru** - Vyjadřuje hodnotu aplikovanou při experimentu, kdy v případě spojitého faktoru se používá minimum a maximum, zatímco u kategoriálního faktoru se používá kategorie.
- **Efekt faktoru** - Popisuje změnu odezvy vyvolanou změnou úrovně faktoru.
- **Experimentální prostor** - Udává neznámý prostor vymezený úrovněmi faktorů, v němž se nachází řešení. Např. u dvoufaktorového experimentu se jedná o plochu čtverce, kde v každém rohu je umístěna jedna kombinace nastavení faktorů.
- **Replikace** - Znamená opakování základního experimentu nebo jen jeho dané části při zachování kombinace úrovní faktorů. Umožňuje experimentálně získat přibližný odhad chyby experimentu a přesněji odhadnout vliv daného faktoru, případně interakce faktorů.

Diplomové práce, jež uvádí zdroj [61], představuje základní typy návrhů plánovaných experimentů. Dle rešerše literatury se předpokládá nelineární závislost mezi odezvami a faktory. Z tohoto důvodu byl zvolen plánovaný experiment typu Centrálně kompozitní návrh, jež spadá do Metod odezvodých ploch. Návrh bude tedy složen ze dvou faktorů na dvou úrovních. Hlavním výsledkem bude regresní model pro predikci účinnosti a tlakové ztráty cyklonu v celém rozsahu experimentu.

4.4.1 Centrálně kompozitní návrh

Konstrukce centrálně kompozitního návrhu zahrnuje tři různé části viz body níže a obr. 40, jež geometricky vyobrazuje postup [61].

1. **Faktoriální body** představují jádro návrhu vycházející z úplného faktoriálního plánu 2^k , kde číslo 2 udává počet úrovní každého faktoru a „k“ vyjadřuje počet faktorů. Jedná se o odhadnutí lineárních členů modelu, jež tedy stanovuje odhad lineárních efektů a interakcí. Počet těchto bodů se označuje n_f .
2. **Centrální bod** se nachází uprostřed experimentálního prostoru, tedy nastavení všech faktorů se nachází na střední úrovni. Měřením v centrálním bodě se stanoví zda vztah odezva/faktor nabývá lineárního či nelineárního chování, respektive zda zakřivení je významné. Počet měření v tomto bodě se realizuje minimálně jednou, tedy $n_e > 0$.
3. **Axiální body** jsou situovány na souřadnicových osách ve vzdálenosti $\alpha > 0$ od centrálního bodu a jejich počet odpovídá $n_s = 2k$. Používají se pro odhadnutí kvadratických členů modelu. Pokud se zvolí $\alpha = 1$, jedná se o face-centered centrální kompozitní návrh. Axiální body se nachází ve středech jednotlivých stěn k -rozměrné krychle. Při rotačním návrhu centrálně kompozitního plánu je $\alpha = \sqrt{k}$, tedy axiální body jsou umístěny vně k -rozměrné krychle.

Matematický zápis regresního modelu tohoto návrhu má podobu rov. (28) [61].

$$y = \beta_0 \cdot \beta_1 x_1 \cdot \beta_2 x_2 \cdot \beta_{12} x_1 x_2 \cdot \beta_{11} x_1^2 \cdot \beta_{22} x_2^2 \quad (18)$$

kde y – hodnota odezvy

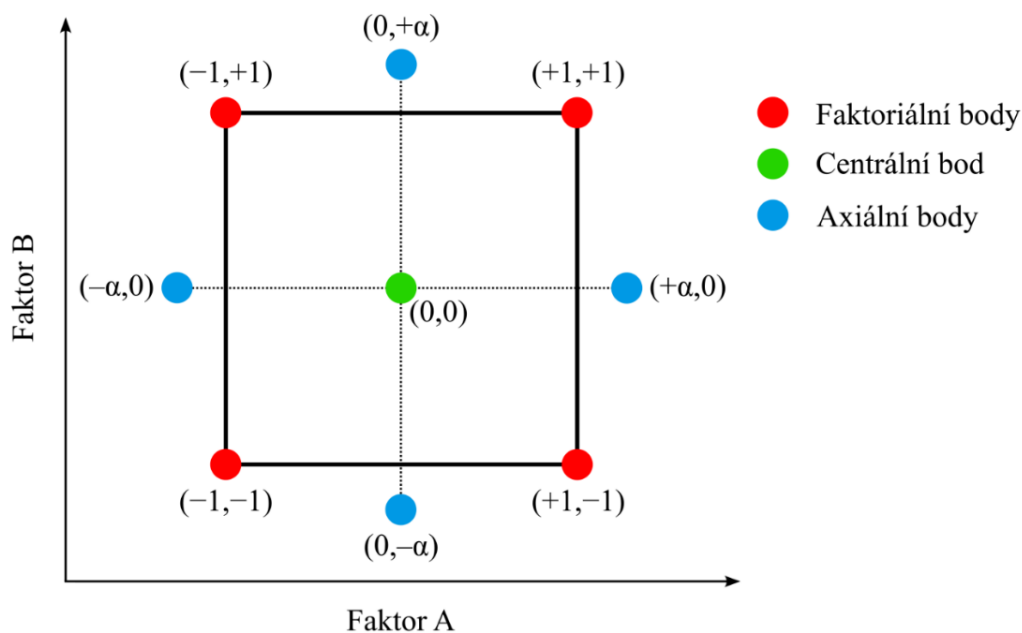
β_0 – celkový průměr všech pozorování

$\beta_1, \beta_2, \beta_{12}$ – regresní koeficienty rovny polovině odhadu efektu

x_1 a x_2 – kódované proměnné reprezentující faktory A a B

$x_1 x_2$ – interakci AB

Návrh pro dva dvouúrovňové faktory centrálně kompozitního faktoru se skládá tedy celkem z 9 bodů, respektive ze 4 faktoriálních bodů, 4 axiálních bodů a 1 centrálního bodu. Úrovně faktorů jsou kódovaně značený viz obr. 40 a tab. 9 [61].



obr. 40: Geometrické znázornění centrálně kompozitního návrhu pro dva faktory, upraveno [61]

Číslo měření	Označení bodu	Faktory		Odezva
		A	B	
1	-1, -1	-1	-1	y_1
2	1, -1	1	-1	y_2
3	-1, 1	-1	1	y_3
4	1, 1	1	1	y_4
5	0, $-\alpha$	0	$-\alpha$	y_5
6	α , 0	α	0	y_6
7	0, α	0	α	y_7
8	$-\alpha$, 0	$-\alpha$	0	y_8
9	0, 0	0	0	y_9

tab. 9: Centrálně kompozitní plán s kódovaným značením pro dva faktory

4.5 Návrh experimentu

Jak uvádí řešerše literatury, výkon cyklonového odlučovače se skládá zejména z účinnosti odloučení kapaliny z proudu plynu a tlakové ztráty. Obě tyto veličiny jsou klíčové při výběru cyklonu do uvažovaného procesu a mohou být ovlivněny mnoha faktory. Jedním z faktorů, jenž má významný vliv na oba ústřední parametry, je rychlost plynu na vstupu do cyklonu, kdy s rychlostí narůstá účinnost separace i úbytek tlaku. Proto jako jeden z kontrolovatelných faktorů při experimentu byl zvolen hmotnostní průtok páry, jenž s rychlostí úzce souvisí.

Druhým zvoleným faktorem je koncentrace NaCl ve vodě přiváděné do vakuové odparky. Sůl zastupuje obecné znečištění rozpuštěnými látkami, které může být ve formě

kapiček přenášeno do destilátu. Míra kontaminace vstupní vody má tedy vliv na čistotu generované brýdové páry, která následně proudí do cyklonu za účelem odloučení kapiček s rozpuštěnou solí.

Pro experiment byla navržena koncentrace soli rozpuštěné v pitné vodě 4200 a 10 300 mg/l. Během experimentu se však lépe bude pracovat s jednotkou elektrické vodivosti $\mu\text{S/cm}$, proto bude množství soli obsažené ve vodě přepočítáno na vodivost dle modelu uvedeného na obr. 39. Na základě zkušebních předtestů byla stanovena přibližná minimální a maximální hodnota průtoku vstupující páry do cyklonu na 2,8 a 9 kg/h. Hmotnostní průtok pro experiment byl tedy navržen na 4 a 7,8 kg/h, tím se zajistí potřebná rezerva pro měření v axiálních bodech, jejichž vzdálenost bude odpovídat rotačnímu návrhu, tedy $\alpha = 1,41$.

Při průtocích páry nižších než 2,8 kg/h cyklon nevykazoval téměř žádné odloučení kapiček po dobu 15 minut, což mohlo být způsobeno nízkou rychlostí odsávání páry z odparky, kdy tedy nedocházelo k významnému únosu kapaliny. Případně mohly být strhávány pouze drobné kapičky, které se při tak nízkém průtoku nedokázaly odloučit a procházeli napříč cyklonem společně s párou. Naopak pokud průtok páry překročil 9 kg/h, bylo pozorováno náhlé zahlcení cyklonu. Příčinou byla tomu odpovídající vysoká rychlost odvodu páry z odpařovací komory, jež strhávala značné množství kapaliny. Níže tab. 10 shrnuje navržené hodnoty nezávislých faktorů, volbu zkoumaných proměnných a pořadí v jakém bude probíhat měření.

Číslo měření	Bod	Faktory		Odezva	
		M_P [kg/h]	EC [$\mu\text{S/cm}$]	η [%]	Δp [Pa]
1	1, -1	7,8	8 308		
2	0, 0	5,9	14 077		
3	-1, -1	4	8 308		
4	0, 0	5,9	14 077		
5	-1, 1	4	19 846		
6	0, 0	5,9	14 077		
7	1, 1	7,8	19 846		
8	$-\alpha, 0$	3,21	14 077		
9	0, 0	5,9	14 077		
10	$0, -\alpha$	5,9	5 943		
11	0, 0	5,9	14 077		
12	$\alpha, 0$	8,59	14 077		
13	0, 0	5,9	14 077		
14	$0, \alpha$	5,9	22 212		

tab. 10: Zvolený rozsah obou faktorů experimentu

Experiment tedy bude zahrnovat měření ve čtyřech faktoriálních bodech, přičemž v každém intervalu mezi nimi bude změřen centrální bod. Stejným střídavým způsobem se provede test pro čtyři axiální body. Celkem tedy bude realizováno 14 měření, z toho 6 replikací na středních provozních podmínkách k identifikaci variability odezvy.

4.5.1 Výpočet účinnosti

Účinnost odloučení kapiček uvnitř cyklonu je možné stanovit z poměru hmotností odseparovaných kapiček ku hmotnosti páry s ohledem na koncentraci obsažené soli v každé frakci viz rov. 19.

$$\eta = \frac{M_K \cdot TDS_K}{M_P \cdot TDS_P} \cdot 100 [\%] \quad (19)$$

Za tímto účelem bude v průběhu experimentu zaznamenávána hmotnost destilátu a odloučené kapaliny z proudu páry cyklonem, včetně jejich elektrické vodivosti. Hmotnost a kvalita páry na vstupu do cyklonu bude vypočtena na základě hmotnostní bilance viz rov. 20 a 21.

$$M_P = M_K + M_D \quad (20)$$

$$M_P \cdot TDS_P = M_K \cdot TDS_K + M_D \cdot TDS_D \quad (21)$$

kde indexy P - brýdová pára
K - odloučené kapičky
D - destilovaná voda

Naměřené hodnoty EC [$\mu\text{S}/\text{cm}$] dané složky lze převést na TDS [mg/l] dle rov. 22. Dále se uvažuje, že objem jednoho litru vody se rovná hmotnosti jednoho kilogramu.

4.6 Průběh experimentu

Experiment probíhal v laboratoři s okolním tlakem 98,5 kPa a přibližné teplotě 20 °C. Při tomto experimentu byla sůl přimíchávána do nádrže s čistou vodou, která se ohřívala na cílovou teplotu 70 °C. Cirkulace vody tak způsobila důkladné promísení se solí. Tedy do nádrže se přisypával chlorid sodný, dokud se nepodařilo dosáhnout požadované salinity, jež byla měřena vodivostní sondou s korekcí na 20 °C umístěné v potrubní síti.

Požadovaný průtok vstupní páry do cyklonu byl regulován manuálně pomocí jehličkového ventilu situovaného na vstupu do vakuové odparky na začátku každého měření. Změnou polohy ventilu se tedy zvyšovala či snižovala produkce páry. Mžiková odparka pracovala v závislosti na rychlosti vstupující slané vody přibližně za tlaku v rozmezí 70–140 mbar a tomu odpovídající teplotě varu 29–44 °C.

Aby bylo zajištěna přesnost výsledků prvního testu, byla na několik minut uvedeno zařízení do chodu k zahřátí systému. Jinak by například v cyklonovém odlučovači mohlo ze začátku docházet ke kondenzaci brýdových par vlivem chladných stěn, což by znehodnotilo výsledky experimentu. Zařízení bylo v provozu pro každé měření s odpovídajícím provozním nastavením po dobu 30 minut. Po tomto uplynulém čase se ventilem zamezil ihned přístup roztoku do odparky, aby se nemohla dále generovat pára. Poté se odebraly odseparované kapičky z akumulčního zásobníku z pod cyklonu do otevřené nádoby. Pomocí digitální váhy TScale JW-15HR s přesností na 0,5 g se zjistila a zaznamenala hmotnost zachyceného kapalného úletu. Následně

se do vzorkovnic odebrala část této kapaliny a nechala se zchladnout na okolní teplotu laboratoře, jež odpovídala přibližně 20 °C. Za využití konduktometru Vernier CON-BTA s přesností 1 % z rozsahu byla následně změřena a zaznamenána vodivost vzorků. Totéž bylo realizováno pro získanou destilovanou vodu. Zmíněná data prezentuje tab. 11.

Číslo měření	Bod	Destilovaná voda		Odloučené kapičky	
		M _D [g]	EC _K [μS/cm]	M _K [g]	EC _K [μS/cm]
1	1, -1	3942,2	3	69,4	1386
2	0, 0	3178,8	2	51,4	2653,9
3	-1, -1	2005	3	30,4	491
4	0, 0	2767,2	2	61,8	2176,4
5	-1, 1	1921,4	4	42,2	4117,1
6	0, 0	2953,8	3	54,2	2991,4
7	1, 1	3743,8	4	64,8	2520,7
8	-α, 0	1551,6	3	13,2	2785
9	0, 0	2847,4	3	57,8	2368
10	0, -α	2836,8	5	55,4	1536
11	0, 0	2245,4	25	61,4	1897
12	α, 0	4211,4	5	112,2	6568
13	0, 0	2906	2	52,8	2473
14	0, α	2806,8	2	47	3437

tab. 11: Hmotnost a vodivost destilátu a odloučených kapiček

Měření číslo 11 v centrálním bodě se významně odlišuje elektrickou vodivostí destilátu od ostatních hodnot EC na středních provozních podmínkách. Proto nebude zahrnuto pro vyhodnocení v plánovaném experimentu v Minitabu.

Dle výše uvedené tab. 7 se salinita destilované vody pohybuje v rozmezí 0–10 μS/cm při 25 °C, což tedy odpovídá přibližně 0–8,5 μS/cm za teploty 20 °C. Za předpokladu změny salinity o 2,5 % při poklesu teploty o 1 °C. Z tab. 11 vyplývá, že bylo dosaženo při každém měření kvalitního destilátu kromě vyřazeného měření z DOE.



obr. 41: Vzorky (vlevo) a zásobník na odloučené kapky z cyklonu (vpravo)

Ideální nastavení požadovaných provozních parametrů je málokdy dosažitelné. V průběhu experimentu docházelo ke kolísání a mírnému klesání průtoku páry a salinity vody na vstupu do odparky. Pokles rychlosti lze vysvětlit postupným ochlazováním roztoku v nádrži. V důsledku toho bylo nutné stanovit průměrné hodnoty pro zmíněné a další klíčové parametry nezbytné pro komplexní analýzu experimentu. Následující tab. 12 obsahuje zaznamenané reálné faktory a odezvy.

Číslo měření	Bod	Faktory		Odezva	
		M_p [kg/h]	EC [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	η [%]	Δp [Pa]
1	1, -1	7,80	8470,31	89,05	1661,53
2	0, 0	5,84	13942,64	95,55	1165,22
3	-1, -1	4,01	8347,05	71,28	773,03
4	0, 0	5,83	14113,23	96,05	1259,94
5	-1, 1	3,96	19554,37	95,76	764,00
6	0, 0	5,81	14314,52	94,82	1183,36
7	1, 1	7,87	19287,40	91,60	1701,61
8	$-\alpha$, 0	3,07	14381,27	88,76	589,86
9	0, 0	5,84	13990,00	94,13	1143,44
10	0, $-\alpha$	5,92	6125,08	85,71	1239,36
11	0, 0	5,81	14221,58	67,48	1136,56
12	α , 0	8,56	14245,94	97,22	1768,03
13	0, 0	5,85	14486,64	95,74	1177,69
14	0, α	5,82	21985,55	96,64	1144,94

tab. 12: Skutečné faktory a odezvy experimentu

Velká většina naměřených hmotnostních průtoků vykazuje odchylky v rozsahu 0–1,6 % ve srovnání s teoretickými hodnotami uvedenými v tab. 10, pouze měření číslo 8 vykazuje větší rozdíl a to 4,4 %. Naproti tomu vodivost vstupní vody má maximální odchylku od požadované hodnoty 3 %. Tyto odchylky lze považovat za zanedbatelné a lze předpokládat, že nebudou podstatně či negativně ovlivňovat výsledky plánovaného experimentu z programu Minitab. Nejvyšší separační účinnosti 97,22 % bylo dle tab. 12 dosaženo v průběhu experimentu u měření číslo 12. Toto měření odpovídalo salinitě vstupní vody 14 246 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a největšímu nastavovanému průtoku 8,56 kg/h., což vedlo také k nejvyšší tlakové ztrátě. Při vysoké rychlosti tak pravděpodobně dochází k únosu většího množství kapaliny v podobě rozměrnějších kapiček, než tomu je u nízkých rychlostí. Tyto kapky se pak následně snáze oddělí od proudu páry v cyklonu působením odstředivé síly.

Z membránového čerpadla se vždy nepodařilo odčerpat 100 % destilátu za využití tlakového vzduchu. Neodčerpaná část destilátu při jednom manuálním odběru se pohybovala okolo 0,2 litrů. Avšak vzhledem k výše uvedeným výsledkům, kdy destilát dosahuje relativně konstantních hodnot se nepředpokládá výrazné zkreslení výsledků.

V neposlední řadě proběhlo testování ve třech vybraných provozních podmínkách bez zapojeného cyklonu, tedy cílem bylo ověřit důležitost zařízení na odstranění kapiček z proudu páry v odparkách viz tab. 13.

Číslo měření	Bod	Faktory	
		M _P [g]	EC [μS/cm]
1	-1, -1	1647,4	4
2	0, 0	2942,2	50
3	1, 1	3878,2	57

tab. 13: Skutečná hmotnost a salinita destilátu

Na základě rovnice (24) a (25) byla také vypočítána teoretická hmotnost a vodivost destilátu, které by bylo dosaženo bez umístění cyklonu za odparku viz tab. 14.

Číslo měření	Bod	Brýdová pára		Číslo měření	Bod	Brýdová pára	
		M _P [g]	EC _P [μS/cm]			M _P [g]	EC _P [μS/cm]
1	1, -1	4011,6	26,93	8	-α, 0	1564,8	26,47
2	0, 0	3230,2	44,20	9	0, 0	2905,2	50,05
3	-1, -1	2035,4	10,29	10	0, -α	2892,2	34,33
4	0, 0	2829	49,50	11	0, 0	2306,8	74,83
5	-1, 1	1963,6	92,40	12	α, 0	4323,6	175,31
6	0, 0	3008	56,85	13	0, 0	2958,8	46,10
7	1, 1	3808,6	46,82	14	0, α	2853,8	58,57

tab. 14: Teoretická hmotnost a salinita destilátu

Obě výše uvedené tabulky potvrzují významnost zařízení na odloučení stržené kapaliny párou v technologiích odparek. Teoreticky nebyla získána dostatečně kvalitní destilovaná voda, jejíž hodnota dle tab. 7 by měla nabývat alespoň 10 μS/cm při 25 °C, což odpovídá 8,5 μS/cm při teplotě 20 °C. Nejvíce se tomu přibližuje test číslo 3 za minimálního provozního nastavení, což se dalo předpokládat. Za nejnižšího průtoku páry a při nejnižší salinitě vstupní vody do odparky dochází k únosu pouze malého množství kapiček, a to s malým množstvím soli. Naopak dle skutečných hodnot bylo dosaženo kvalitního destilátu při stejných podmínkách, avšak bylo vyprodukováno přibližně o 18 % destilované vody méně při přibližně stejném hmotnostním průtoku páry a koncentrace NaCl ve vodě. Pravděpodobně vznikla nedopatřením chyba v průběhu měření a nelze tedy považovat hodnotu za spolehlivou. Mírná odlišnost v dalších dvou bodech lze považovat za přijatelnou.

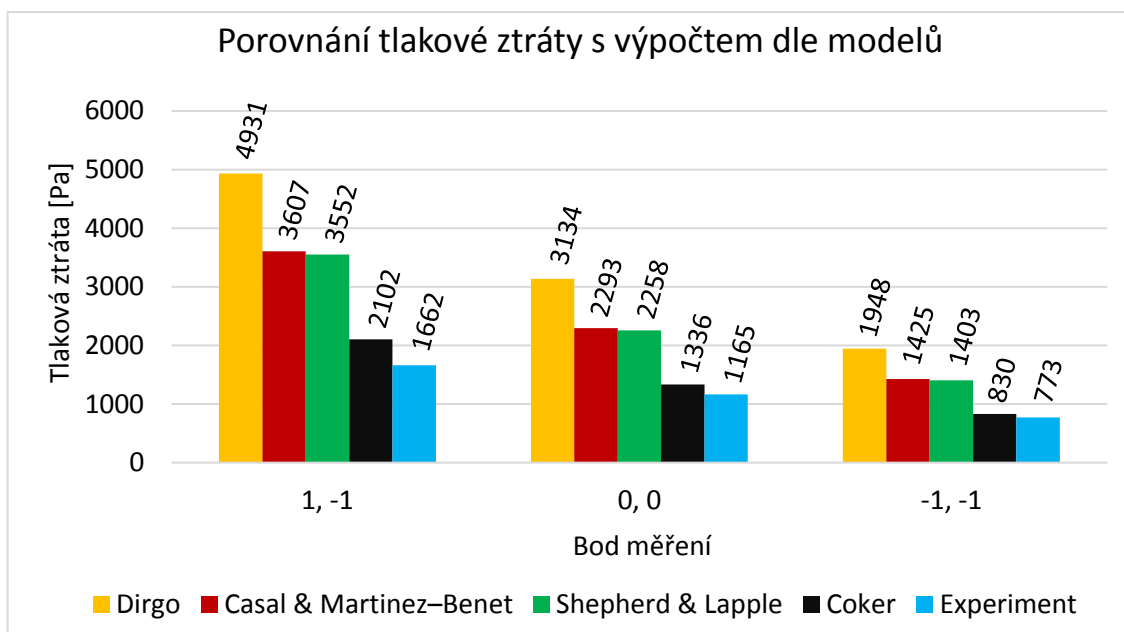
4.7 Ověření modelů tlakové ztráty

V podkapitole 3.8.2 Vypočet tlakové ztráty jsou uvedeny čtyři modely pro výpočet přibližného poklesu tlaku napříč cyklonem od autorů Shepherd & Lapple, Casal & Martinez-Benet, Coker a Dirgo. Není známo přesně pro jaké provozní podmínky byly matematické modely odvozeny. Níže tab. 15 přibližuje pro jaké podmínky budou zmíněné modely ověřovány výpočtem pro tři zvolené úrovně nastavení.

Bod měření	Tlak na vstupu [mbar]	Teplota páry na výstupu [°C]	Hustota páry [kg/m ³]	Vstupní rychlost páry [m/s]
1, -1	106,5	42,2	0,071	158,41
0, 0	83,1	37,9	0,058	140,57
-1, -1	61	32,5	0,043	127,77

tab. 15: Podmínky pro ověření modelů na výpočet tlakové ztráty

Výsledky teoretických a naměřených hodnot poklesu tlaku graficky znázorňuje sloupcový graf 1.



graf 1: Porovnání naměřené tlakové ztráty s výpočtem dle modelů

Tento graf 1 jasně ilustruje tendenci všech modelů nadhodnocovat pokles tlaku. Konkrétně výpočet založený na modelu Dirgo vykazuje nejvyšší nadhodnocení, dosahující přibližně 152-197 % ve srovnání s experimentálními výsledky. Další dva modely, Casal & Martinez-Benet a Shepherd & Lapple, vykazují navzájem podobné hodnoty, ale odcházejí se od experimentu přibližně o 84–117 %, respektive 81–114 %. Tyto tři zmíněné modely jsou nevhodné pro přesnou nebo jen hrubou predikci poklesu tlaku v testovacím cyklonu s ohledem na jeho geometrii a provozní podmínky.

Naopak model navržený autorem Coker vyniká jako jediný, vykazuje srovnatelně nižší nadhodnocení tlakové ztráty v rozmezí 7-27 %. V důsledku toho lze tento model použít k poskytnutí slušného odhadu poklesu tlaku uvnitř cyklonu za daných provozních podmínek a geometrie cyklonu.

4.8 Analýza DOE

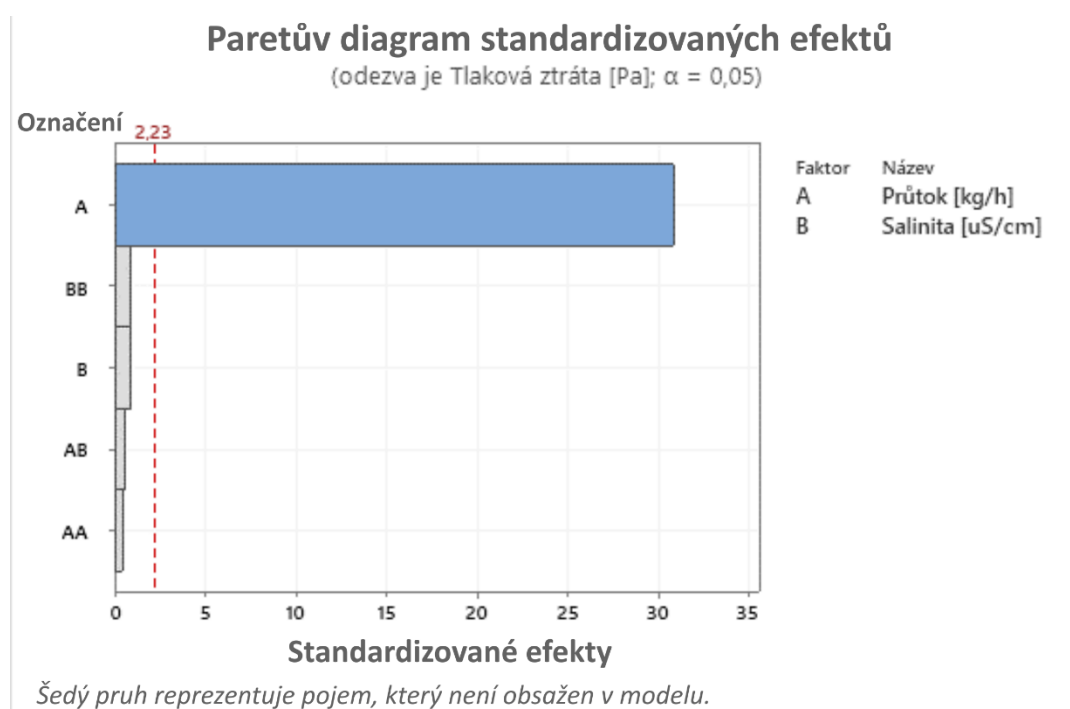
Analýza získaných dat z plánovaného experimentu byla provedena za využití softwaru Microsoft Excel a výkonného statistického softwaru Minitab, jenž poskytuje pokročilé statistické a grafické nástroje k vyhodnocení DOE.

Počáteční fáze rozboru experimentu zaměřeného na identifikaci rozhodujících faktorů a interakcí zahrnuje posouzení jejich významnosti. Toto hodnocení vizualizuje Paretův diagram. Diagram obsahuje svislou referenční čáru červené barvy, která představuje prahovou hladinu kritické významnosti pro riziko $\alpha = 0,05$. Pokud modrý pruh představující faktor či interakci přesáhne zmíněnou hranici, je považován za významný a naopak. Nicméně je důležité poznamenat, že tento nedostatek statistické významnosti neznamená jejich neschopnost ovlivnit výsledky experimentu.

Dalším krokem je vytvoření regresního modelu daného pozorovaného procesu ve vyhrazeném experimentálním prostoru a ověřit zda se model shoduje s naměřenými daty z experimentu.

4.8.1 Tlakové ztráty

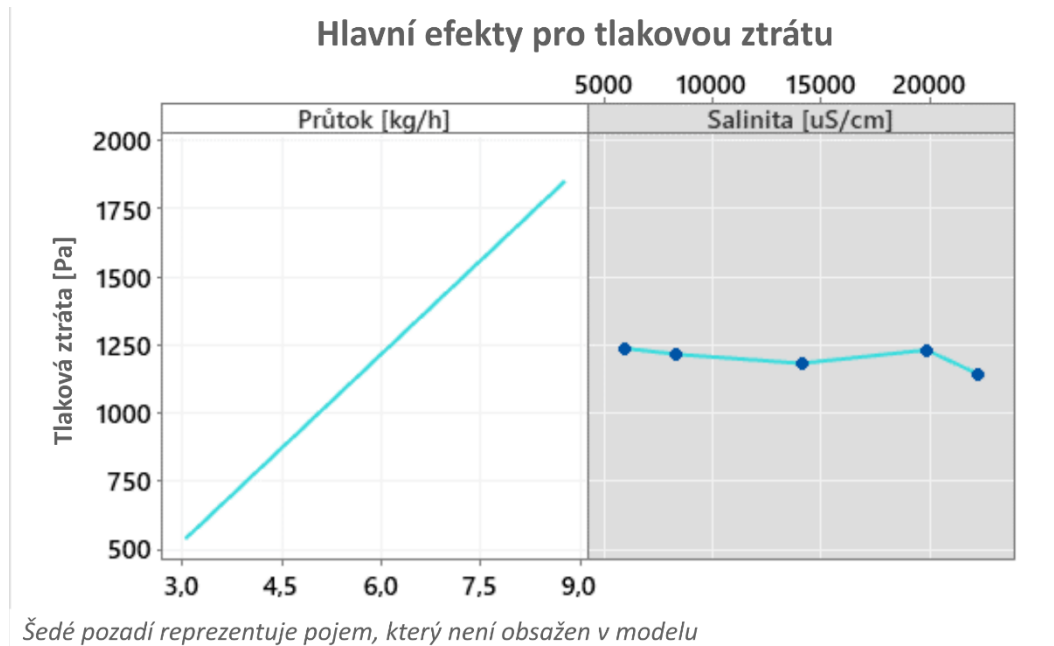
Míra tlakového úbytku uvnitř cyklonu dle teorie závisí na jeho geometrii a na hustotě a zejména rychlosti, respektive průtoku, proudícího média a měla by nabývat nelineárního charakteru. Paretův diagram tlakové ztráty prezentuje obr. 42.



obr. 42: Paretův diagram pro tlakovou ztrátu cyklonu

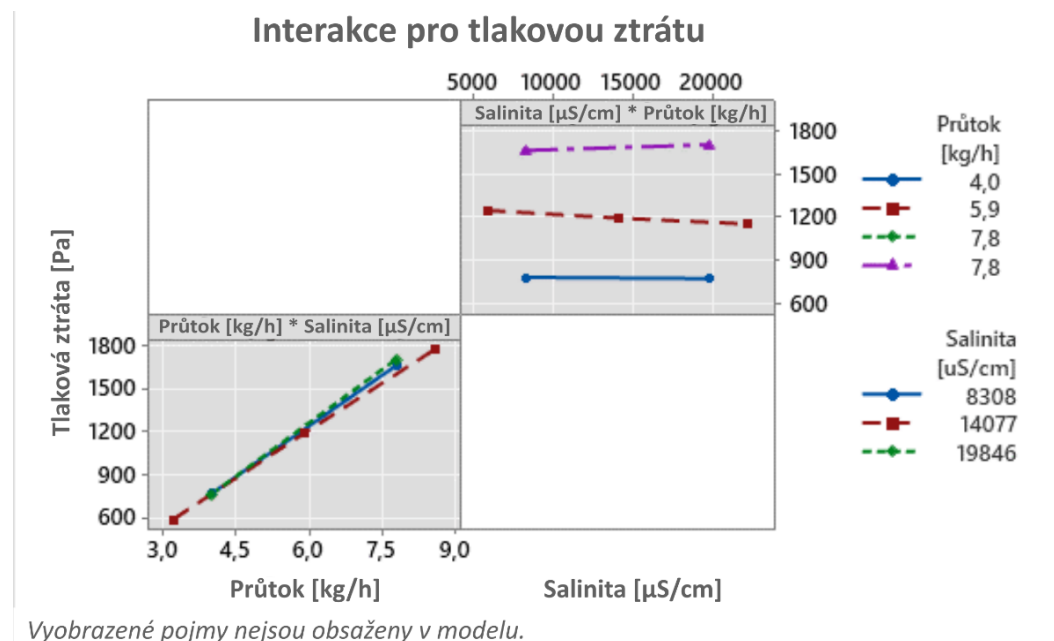
V rámci experimentu se jako velmi významný faktor na tlakovou ztrátu ukazuje pouze hmotnostní průtok brýdové páry, zatímco zbývající faktor a interakce vykazují jednoznačnou statistickou nevýznamnost. Výsledky tedy nejsou nijak překvapivé. Vliv množství soli rozpuštěné v kapičkách vody unášených párou na úbytek tlaku v cyklonu je zanedbatelný. Přítomnost soli může zvyšovat hustotu páry, avšak její koncentrace nabývá velmi malých hodnot na to, aby to mělo významný dopad na tlakovou ztrátu. Nevýznamnost interakce AA naznačuje pouze malou odchylku od linearitu, to může být vysvětleno měřením tlakové ztráty v závislosti na průtoku v malém experimentálním prostoru. Lze předpokládat, že by se tato kvadratická podmínka projevila ve větším zkoumaném rozsahu průtoků.

Hlavní efekty nezávislých faktorů na odezvu vyobrazuje graf 2, kde lze vidět vlevo lineární závislost průtoku na tlakovou ztrátu cyklonu při zachování stále salinity a vpravo téměř konstantní tlakovou ztrátu pro různě slanou vodu za konstantního průtoku.



graf 2: Závislost tlakové ztráty na salinitě a průtoku

Následující graf 3 zobrazuje vždy vztah mezi faktory a proměnnou odezvy na základě kombinace úrovní faktorů. Oba grafy tedy potvrzují, že tlaková ztráta je ovlivněna především hmotnostním průtokem brýdových par.

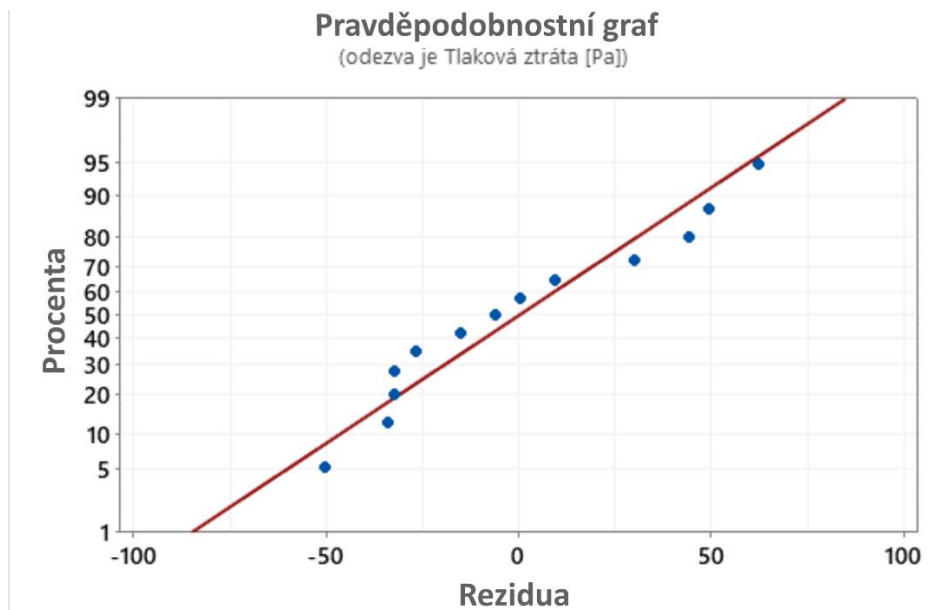


graf 3: Interakce mezi faktory a tlakovou ztrátou

Pro stanovení matematického modelu zkoumaného procesu je tedy uvažován pouze faktor průtoku. Rovnice (22) představuje regresní model pro výpočet tlakové ztráty s hodnotou spolehlivosti $R^2 = 98,97 \%$, Konstanty modelu vyhodnotil program Minitab.

$$\Delta p = -159,2 + 229,76 \cdot A \quad (18)$$

Následující graf 4 ukazuje, jak dobře model odpovídá naměřeným datům. Tedy červená přímka reprezentuje model a skutečné hodnoty získané měřením v průběhu experimentu zastupují modré datové body.



graf 4: Přesnost modelu pro výpočet tlakové ztráty

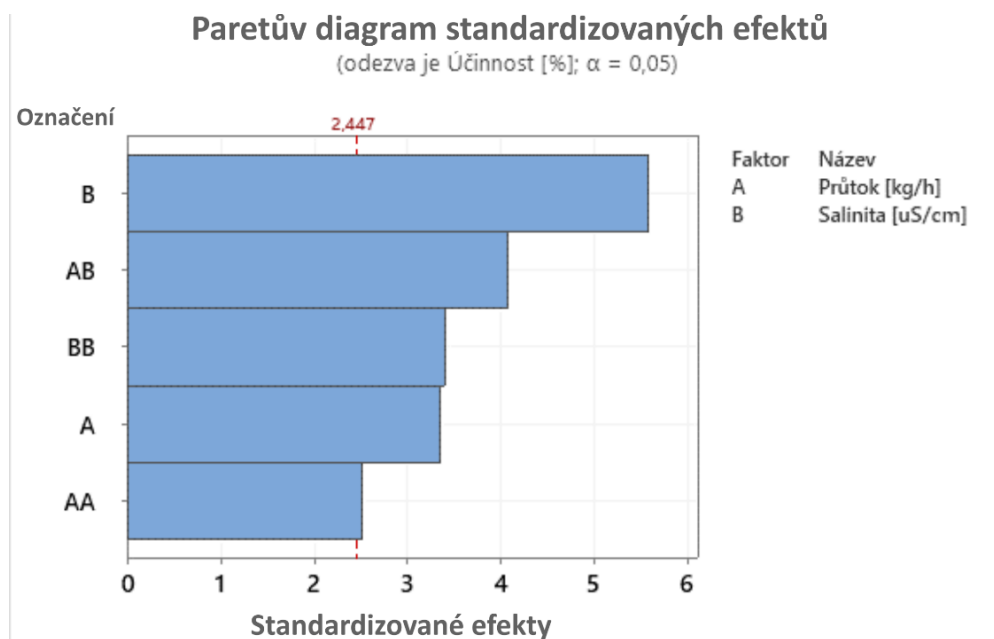
Přesnost modelu je demonstrována také v tab. 16, která porovnává tlakové ztráty naměřené z tab. 12 s vypočtenými modelem. Absolutní chyba se pohybuje řádově v desítkách pascalů a relativní chyba v jednotkách procent. V důsledku toho lze přesnost modelu považovat za přijatelnou.

Číslo měření	Bod	Naměřená tlaková ztráta [Pa]	Vypočtená tlaková ztráta [Pa]	Absolutní chyba [Pa]	Relativní chyba [%]
1	1, -1	1662	1634	28	1,71
2	0, 0	1165	1183	18	-1,53
3	-1, -1	773	762	11	1,46
4	0, 0	1260	1180	80	6,77
5	-1, 1	764	750	14	1,90
6	0, 0	1183	1175	8	0,69
7	1, 1	1702	1649	53	3,20
8	$-\alpha$, 0	590	547	43	7,82
9	0, 0	1143	1183	40	-3,37
10	0, $-\alpha$	1239	1201	38	3,20
11	0, 0	1137	1177	40	-3,41
12	α , 0	1768	1808	40	-2,21
13	0, 0	1178	1186	8	-0,69
14	0, α	1145	1178	34	-2,84

tab. 16: Přesnost modelu pro tlakovou ztrátu

4.8.2 Odlučivost kapek

Dle teoretických poznatků má na účinnost separace kapek z proudu páry velký vliv rychlost, respektive průtok, této páry generované v odparce. Dále pak koncentrace částic, která je reprezentována množstvím soli, ve vodě ovlivňuje účinnost separace kapalného úletu z proudu páry. Na obr. 43 se nachází Paretův diagram pro účinnost cyklonu.



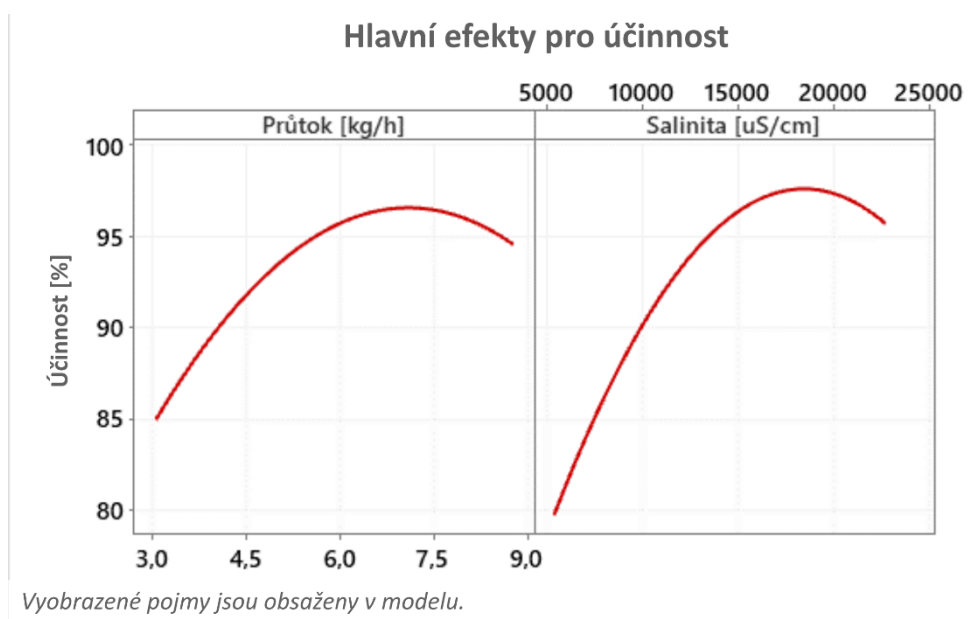
obr. 43: Paretův diagram pro účinnost odlučivosti cyklonu

Diagram ilustruje důležitost různých faktorů a jejich interakcí a zdůrazňuje salinitu jako primární faktor ovlivňující účinnost separace. Zvyšováním množství rozpuštěného NaCl ve vodě při zachování stejného průtoku slanost páry produkované ve vakuové odparce stoupne. V důsledku toho se v cyklonu oddělí větší množství soli rozpuštěné v kapičkách vody, přičemž kvalita destilátu zůstává relativně konstantní napříč různými provozními kombinacemi v rámci definovaného prostoru. To je pravděpodobně důvod, proč se salinita projevila jako významnější faktor než samotný průtok.

Změna průtoku při zachování konstantní koncentrace soli ve vodě přímo ovlivňuje účinnost separace. Respektive vyššímu průtoku, tedy i rychlosti na vstupu do cyklonu, odpovídá lepší účinnost odloučení kapalného úletu a naopak. Toto lze přičíst zesílené odstředivé síle generované v důsledku vyšších rychlostí.

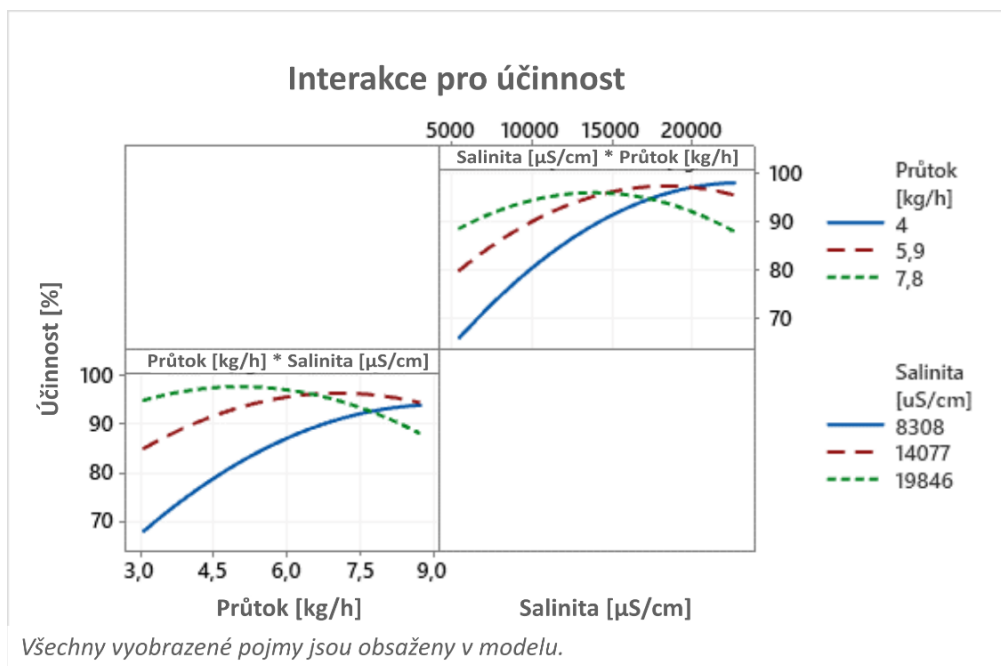
Interakce označená jako AB vystupuje jako nejvýznamnější interakce, jelikož salinita páry je úzce spojena s velikostí průtoku páry a s koncentrací soli vstupující vody do odparky. Pokud si voda udržuje stálou koncentraci rozpuštěné soli, množství NaCl unášeného párou bude narůstat společně s průtokem páry. Pokud však salinita vody začne také stoupat, odpovídajícím způsobem vzroste opět slanost páry. Další významné interakce BB a AA představují kvadratickou závislost příslušného faktoru vůči odezvě, přičemž první zmíněná se více odchyluje od linearity.

Vizualizaci průměrné odezvy na různých úrovních každého faktoru, zatímco ostatní faktory zůstávají konstantní, ilustruje graf 5. Tedy lze vidět, jak se mění účinnost cyklonu se změnou průtoku páry a za konstantní salinity (vlevo) a za stálého průtoku s proměnlivou salinitou (vpravo).



graf 5: Závislost účinnosti na salinitě a průtoku

Dále graf 6 prezentuje křivky představující variaci odezvy pro každou kombinaci úrovní faktorů, respektive jak se mění odezva na různých úrovních faktorů s ohledem na účinek přítomných interakcí.

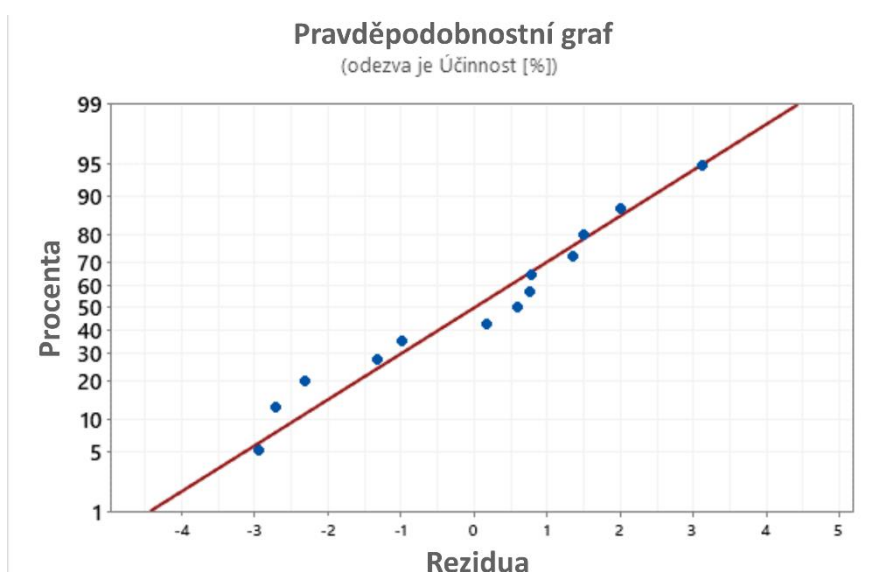


graf 6: Interakce mezi faktory a účinností

Rovnice (23) představuje získaný model pro stanovení účinnosti cyklonového odlučovače ve zkoumaném experimentálním prostoru, jehož hodnota spolehlivosti je $R^2 = 92,82 \%$. Konstanty, jež násobí faktory a interakce, vypočítal opět program Minitab.

$$\eta = -14,4 + 17,14 \cdot A + 6,82 \cdot 10^{-3} \cdot B - 0,713 \cdot A^2 - 1,046 \cdot 10^{-7} \cdot B^2 - 5 \cdot 10^{-3} \cdot A \cdot B \quad (23)$$

Uvedený graf 7 níže demonstruje míru shody mezi modelem a experimentálními daty. V tomto znázornění červená čára opět odpovídá modelu, zatímco modré body představují skutečné hodnoty získané pomocí experimentálních měření.



graf 7: Přesnost modelu pro účinnost odlučivosti

Přesnost modelu je patrná z tabulky 16, která představuje srovnání mezi účinností získanou z naměřených dat a uvedenou v tabulce 12 a účinností cyklonu vypočítanou modelem. Absolutní i relativní chyby jsou v jednotkách procent. Exaktnost modelu lze tedy považovat za přijatelnou.

Číslo měření	Bod	Naměřená účinnost [%]	Vypočtená účinnost [%]	Absolutní chyba [%]	Relativní chyba [%]
1	1, -1	89,05	93,15	4,10	-4,40
2	0, 0	95,55	95,43	0,12	0,12
3	-1, -1	71,28	75,76	4,49	-5,92
4	0, 0	96,05	95,57	0,48	0,50
5	-1, 1	95,76	96,93	1,17	-1,21
6	0, 0	94,82	95,72	0,90	-0,94
7	1, 1	91,60	93,07	1,47	-1,57
8	$-\alpha$, 0	88,76	85,89	2,87	3,34
9	0, 0	94,13	95,47	1,35	-1,41
10	0, $-\alpha$	85,71	81,80	3,91	4,78
11	0, 0	67,48	95,64	28,17	-29,45
12	α , 0	97,22	95,03	2,20	2,31
13	0, 0	95,74	95,95	0,21	-0,22
14	0, α	96,64	96,60	0,04	0,04

tab. 17: Přesnost modelu pro účinnost

5 Návrh úprav pro zvýšení účinnosti odmlžování

Na základě výzkumu provedeného v této studii byla navržena teoretická úprava s cílem zvýšit účinnost oddělování kapiček kapaliny z proudu brýdové páry. Avšak nelze přesně kvantifikovat změnu daných parametrů a proměnných dle této práce.

Na konci zapuštěné výstupní trubky se doporučuje zavést rozšiřující se kónickou část s vroubkou na okraji. Tato konstrukční úprava by měla vést k zabránění prosakování a strhávání kapaliny do odsávaného proudu páry, jenž je problémem u běžně zakončených výstupních trubek cyklonu. K tomuto jevu pravděpodobně docházelo v průběhu experimentu, avšak to nebylo možné ověřit.

V literatuře číslo [47] počítačové simulace potvrdily zlepšení separační účinnosti při změně kruhového průřezu na obdélníkový tvar a při navýšení počtu přívodních potrubí do cyklonu. Tedy lze předpokládat vyšší účinnost i v praxi při nahrazení jednoho kruhového vstupu dvěma symetrickými vstupy obdélníkového tvaru za dodržení celkové velikosti vstupní plochy. Tato změna by měla vytvořit symetričtější proudové pole, které má potenciál zvýšit účinnost.

Snížení tlaku ve vakuové odparce vede ke snížení bodu varu kapaliny, což má za následek vyšší produkci páry s nižší hustotou, jež usnadní oddělení kapiček v cyklonu. Dále zvětšení průměru komory vakuové odparky by snížilo rychlost odsávání generované páry a zmírnilo by se tak riziko strhávání značného množství kapaliny způsobující zaplavení cyklonu, které bylo pozorováno během prováděného experimentu při přibližném průtoku 9 kg/h. To by umožnilo maximalizovat vstupní rychlost do cyklonového odlučovače za účelem zvýšení odstředivé síly potřebné pro separaci zejména menších kapek. Tyto změny tedy mají potenciál snížit pravděpodobnost strhávání kapaliny v odparce a zlepšit separaci kapiček v cyklonu.

Při stávající podobě geometrie cyklonu a vakuové odparky se vhodné provozní podmínky z pohledu účinnosti separace kapiček nachází v intervalu 5,9–8,6 kg/h brýdové páry a salinitě vody dopravované do vakuové odparky 14 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Tomu odpovídá dosažená účinnost kolem 95–97 %. Alternativně v intervalu 4–5,9 kg/h produkované páry, ale vodivosti vody okolo 19 000–22 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lze docílit účinnosti přibližně 95,5–96,6 %. Optimální podmínky však byly vyhodnoceny pro definovaný experimentální prostor pomocí získaného modelu pro výpočet účinnosti cyklonu (rov. (23)) a řešitele v programu Microsoft Excel. Nejvyšší možné separační účinnosti 98,25 % je možné teoreticky dosáhnout při 4,23 kg/h páry a salinitě 22 212 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

6 Závěr

Tato diplomová práce se věnovala metodám pro separaci kapaliny z plynu. Cílem této práce bylo představit základní charakteristiky separátorů a výplňových odlučovačů kapek pro odstranění stržené kapaliny z proudu plynné fáze. Dále detailně popsat a experimentální činností ověřit v systému s vakuovou odparkou zvolený typ separační metody a navrhnout úpravy pro zvýšení separační účinnosti na základě získaných poznatků z teorie a realizovaného experimentu. Jako testovací zařízení byl zvolen cyklonový odlučovač, jehož funkce byla úspěšně ověřena na slané vodě za využití plánovaného experimentu. Výsledky testů byly porovnány s teoretickými předpoklady.

Na základě poznatků z rešeršní části této práce byly vybrány dva klíčové faktory a byl zkoumán jejich účinek na tlakovou ztrátu a účinnost odlučivosti cyklonu. Jednalo se o hmotnostní průtok brýdové páry odsávané do cyklonu a koncentraci NaCl obsažené ve vodě přiváděné do vakuové odparky. Teoretické předpoklady naznačovaly nelineární vztah mezi těmito faktory a odpovídajícími odezvami. Proto byl vybrán typ plánovaného experimentu Centrálně kompozitní návrh, jenž zahrnuje jak lineární, tak kvadratické podmínky. Tento experiment tedy vycházel celkem na 14 měření, z toho 6 replikací na středních provozních podmínkách. Avšak kvůli jednomu chybnému měření v centrálním bodě se počet opakování zredukoval na 5 pro analýzu DOE v programu Minitab.

Během rozboru DOE byl zjištěn pouze jeden faktor, jenž významně ovlivňuje pokles tlaku napříč cyklonem. Jedná se o hmotnostní průtok páry, jehož závislost na tlakovou ztrátu byla vyhodnocena pro navržený experimentální prostor jako lineární. Obecně se uvádí nelineární závislost na průtoku, respektive rychlosti. Vliv salinity byl v tomto kontextu dle očekávání vyhodnocen jako zanedbatelný. U obou faktorů byl potvrzen významný vliv na účinnost separace kapiček stržených proudem páry ve vakuové odparce. Mezi zkoumanými faktory měla slanost vody největší účinek na tuto odezvu a vykazovala nelineární závislost. Průtok brýdové páry byl vyhodnocen jako méně důležitý ve srovnání se salinitou a taktéž vykazoval nelineární vztah. Dále byla prokázána interakce mezi průtokem a salinitou. Množství rozpuštěné soli v unášených kapičkách tedy závisí nejen na kontaminaci vstupující vody do odparky, ale i na produkci brýdové páry.

Cyklonový odlučovač prokázal provozní účinnost až 97,22 % při průtoku 8,56 kg/h, respektive vstupní rychlosti 149,27 m/s, a slanosti vody přiváděné do vakuové odparky 14 246 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Kvalita vyprodukované destilované vody tak činila 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Bez použití cyklonu by vodivost zkondenzované páry odpovídala 175,31 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Tlaková ztráta napříč cyklonem za daných podmínek činila 1 768 Pa.

Byly navrženy hypotetické úpravy pro zlepšení separační účinnosti cyklonového odlučovače v konfiguraci s vakuovou odparkou na základě teoretických a experimentální poznatků.

Výsledky této práce jsou experimentálně i statisticky podložené, což je činí vhodnými pro následující výzkumné práce týkající se cyklonových odlučovačů kapek v technologiích odparek, případně i dalších procesů zahrnujících nežádoucí strhávání kapiček kapaliny.

Seznam použité literatury

- [1] Industrial vacuum evaporators for wastewater treatment. In: *Condorchem Envitech* [online]. [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://condorchem.com/en/vacuum-evaporators/>
- [2] M. PANKRATZ, Tom. *Evaporation - A Wastewater Treatment Alternative* [online]. 2000 [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: <https://www.wwdmag.com/biosolids-management/evaporators/article/10917014/evaporation-a-wastewater-treatment-alternative>
- [3] MINTON, Paul E. *Handbook of evaporation technology*. 1986. ISBN 0-8155-1097-7.
- [4] JASCH, Katharina, Jonas SCHULZ, Hans-Jörg BART a Stephan SCHOLL. Droplet Entrainment Analysis in a Flash Evaporator with an Image-Based Measurement Technique. *Chemie Ingenieur Technik* [online]. 2021, **93**(7), 1071-1079 [cit. 2023-04-10]. ISSN 0009-286X. Dostupné z: doi:10.1002/cite.202000248
- [5] Droplet Separation: Technical Literature. *RASCHIG* [online]. [cit. 2022-10-10]. Dostupné z: https://s3.us-west-2.amazonaws.com/linquip.equipment/275797/equipment_275797_catalog_3c6d2ca207e9b10989ae76a1025470338e1d0b84.pdf
- [6] CHANDRANEGARA, Anang Satria. *Review : Improving Mist Eliminator Performance in Gas-Liquid Separators* [online]. 2016 [cit. 2022-09-19]. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.1.3342.4885
- [7] STEWART, Maurice a Ken ARNOLD. *Gas-Liquid and Liquid-Liquid Separators*. 2008. ISBN 978-0-7506-8979-3.
- [8] PERRY, Robert a Don W GREEN. *Perry's chemical engineers' handbook* [online]. New York: McGraw-Hill, 2008 [cit. 2022-10-16]. ISBN 978-0-07-142294-9.
- [9] Mist Elimination Liquid-Liquid Coalescing. In: *Ferrum Energy* [online]. [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://www.ferrumenergy.com/wp-content/uploads/2021/11/Catalogo-Mist-Elimination-Liquid-Liquid-Coalescing.pdf>
- [10] Mist Elimination Processes. In: *Elessent Clean Technologies* [online]. [cit. 2022-10-17]. Dostupné z: <https://elessentct.com/solutions/mist-elimination/>

- [11] Technical Literature: DROPLET SEPARATION. In: *RHODIUS* [online]. [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: <http://www.colasit.be/pdf/rhodium.pdf>
- [12] BAHADORI, Alireza. *Natural Gas Processing Technology and Engineering Design*. 2014. ISBN 978-0-08-099971-5.
- [13] KASSEM, Yasser. *Fundamentals of Oil and Gas Processing: Design and operation of oil field treatment facilities*. 2018. ISBN 978-1790348565.
- [14] Mist Elimination Equipment & Droplet Separation from Gases. In: *Begg Cousland Envirotec Ltd.* [online]. [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://www.bcinsightsearch.com/BCI/adverts/SID233212wpb3.pdf>
- [15] MOKHATAB, Saeid, William A. POE a John Y. MAK. *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing: Principles and Practices*. 4th edition. 2019. ISBN 978-0-12-815817-3.
- [16] What Are The Different Types of Oil and Gas Separators. In: *12:ELEVEN* [online]. [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: <https://www.12eleven.com/news/what-are-the-different-types-of-oil-and-gas-separators>
- [17] Explore the Energy Glossary: Spherical separator. In: *Energy Glossary* [online]. [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: https://glossary.slb.com/en/terms/s/spherical_separator
- [18] HORIZONTAL FILTER SEPARATOR. In: *Exterran* [online]. 2015 [cit. 2022-12-18]. Dostupné z: <https://www.exterran.com/Content/Docs/Products/Filter-Separator-English-Letter-a.pdf>
- [19] ENGINEERING DATA BOOK: Separators and Filters. In: *Gas Processors Suppliers Association* [online]. [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: <https://edoc.pub/ch-07-separators-and-filters-pdf-free.html>
- [20] CONSTANDA, Christian, Bardo E. J. BODMANN a Paul J. HARRIS, ed. *Integral Methods in Science and Engineering: Applications in Theoretical and Practical Research*. Birkhäuser, 2022. ISBN 978-3-031-07170-6.
- [21] *Mist Elimination product catalog - Koch-Glitsch* [online]. In: . 2007 [cit. 2022-20-12]. Dostupné z: <https://pdf.directindustry.com/pdf/koch-glitsch/mist-elimination-product-catalog/21790-217473.html>
- [22] PRODUCTS: KNITTED WIRE MESH - DEMISTER, FILTER ELEMENTS, GASKETS. In: *Jinghong Wire Mesh Products Co., Ltd.* [online]. [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: <https://www.galvanizedwiremesh.com/gi/wire-mesh/knitted-wire-mesh.html>

- [23] Our Products: VANE MIST ELIMINATOR. In: *Sumit Industries* [online]. [cit. 2022-12-01]. Dostupné z: <http://www.sumitindustries.com/vane-mist-eliminator.php>
- [24] Gas/liquid separation technology. In: *Sulzer Chemtech – separation technology* [online]. [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: https://www.sulzer.com/-/media/files/products/separation-technology/feed-inlet-devices/gas_liquid_separation_technology.ashx
- [25] DICKSON, Philip James. *Gas liquid separation within a novel axial flow cyclone separator* [online]. 1998 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/3999>. Ph.D. Thesis. Cranfield University.
- [26] HAIG, C.W., A. HURSTHOUSE, S. MCILWAIN a D. SYKES. An empirical investigation into the influence of pressure drop on particle behaviour in small scale reverse-flow cyclones. *Powder Technology* [online]. 2015, **275**, 172-181 [cit. 2023-02-02]. ISSN 00325910. Dostupné z: doi:10.1016/j.powtec.2015.02.011
- [27] RIETEMA, K. a C. VERVER, ed. *Cyclones in industry: a collection of papers on the principles and utilization of industrial cyclones, originally presented at the two symposia on this subject, organized in 1953 and 1958 by the Royal Dutch Institute of Engineers and the Royal Netherlands Chemical Society* [online]. 1961 [cit. 2023-01-29]. Dostupné z: <https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/4313704/32112.pdf>
- [28] NG, Sin Yuan. *Gas-Liquid Separation Using Axial Flow Cyclones* [online]. 2005 [cit. 2023-01-29]. Dostupné z: <https://etheses.whiterose.ac.uk/25665/1/419640.pdf>. Ph.D. Thesis. University of Sheffield.
- [29] HOFFMANN, Alex a Louis STEIN. *Gas cyclones and swirl tubes: principles, design, and operation*. 2nd ed. Berlin: Springer, 2008. ISBN 978-3-540-74694-2.
- [30] NIU, Zitian, Zhendong FU, Qi YANG, Qi WU, Le YANG a Jianyin MIAO. Modeling and Analysis of Cyclone Separation Efficiency Based on Spacecraft Heat Pump System. *Microgravity Science and Technology* [online]. 2023, **35**(1) [cit. 2023-02-28]. ISSN 1875-0494. Dostupné z: doi:10.1007/s12217-023-10034-3
- [31] PAN, Jiake, Qisong SHEN, Xin CUI, Jiwei WU, Liang MA, Chengcheng TIAN, Pengbo FU a Hualin WANG. Cyclones of different sizes and underflow leakage for aerosol particles separation enhancement. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2021, **280** [cit. 2023-02-27]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2020.124379

- [32] MIKHEEV, Nikolay, Ilya SAUSHIN, Anton PAERELIY, Dmitry KRATIROV a Kirill LEVIN. Cyclone separator for gas-liquid mixture with high flux density. *Powder Technology* [online]. 2018, **339**, 326-333 [cit. 2023-01-30]. ISSN 00325910. Dostupné z: doi:10.1016/j.powtec.2018.08.040
- [33] LI, Qiang, Weiwei XU, Jianjun WANG a Youhai JIN. Performance evaluation of a new cyclone separator – Part I experimental results. *Separation and Purification Technology* [online]. 2015, **141**, 53-58 [cit. 2023-01-31]. ISSN 13835866. Dostupné z: doi:10.1016/j.seppur.2014.10.030
- [34] XIANG, Rongbiao, S.H PARK a K.W LEE. Effects of cone dimension on cyclone performance. *Journal of Aerosol Science* [online]. 2001, **32**(4), 549-561 [cit. 2023-01-31]. ISSN 00218502. Dostupné z: doi:10.1016/S0021-8502(00)00094-X
- [35] SWANBORN, ROMBOUT ADRIAAN. *A New Approach to the Design of Gas-Liquid Separators for the Oil Industry* [online]. The Netherlands, 1988 [cit. 2023-01-31]. Dostupné z: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Aaa5fc516-6b58-4900-90d8-e15a6f332c84>. Ph.D. Thesis. Delft University of Technology.
- [36] WANG, Lingzi, Biyuan LIU, Jianmei FENG a Xueyuan PENG. Experimental study on the separation performance of a novel oil–gas cyclone separator. *Powder Technology* [online]. 2023, **415** [cit. 2023-02-04]. ISSN 00325910. Dostupné z: doi:10.1016/j.powtec.2022.118124
- [37] CORTES, C a A GIL. Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 2007, **33**(5), 409-452 [cit. 2023-03-02]. ISSN 03601285. Dostupné z: doi:10.1016/j.pecs.2007.02.001
- [38] ELSAYED, Khairy a Chris LACOR. The effect of cyclone inlet dimensions on the flow pattern and performance. *Applied Mathematical Modelling* [online]. 2011, **35**(4), 1952-1968 [cit. 2023-01-31]. ISSN 0307904X. Dostupné z: doi:10.1016/j.apm.2010.11.007
- [39] XIAODONG, Li, Yan JIANHUA, Cao YUCHUN, Ni MINGJIANG a Cen KEFA. Numerical simulation of the effects of turbulence intensity and boundary layer on separation efficiency in a cyclone separator. *Chemical Engineering Journal* [online]. 2003, **95**(1-3), 235-240 [cit. 2023-02-05]. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/S1385-8947(03)00109-8
- [40] JAFARI, Pantea, J. HELLSTRÖM a B. GEBART. Turbulence Modelling of a Single-Phase Flow Cyclone Gasifier. *Engineering* [online]. 2017, **09**(09), 779-799 [cit. 2023-02-05]. ISSN 1947-3931. Dostupné z: doi:10.4236/eng.2017.99047

- [41] GRONALD, G. a J.J. DERKSEN. Simulating turbulent swirling flow in a gas cyclone: A comparison of various modeling approaches. *Powder Technology* [online]. 2011, **205**(1-3), 160-171 [cit. 2023-02-07]. ISSN 00325910. Dostupné z: doi:10.1016/j.powtec.2010.09.007
- [42] ZHOU, Wen, Chenglin E, Zixuan LI a Chunxi LU. Separation Characteristics in a Novel Gas–Liquid Vortex Separator. *Industrial & Engineering Chemistry Research* [online]. 2020, **59**(40), 18115-18125 [cit. 2023-02-09]. ISSN 0888-5885. Dostupné z: doi:10.1021/acs.iecr.0c03319
- [43] NAKHAEI, Mohammadhadi, Bona LU, Yujie TIAN, Wei WANG, Kim DAM-JOHANSEN a Hao WU. CFD Modeling of Gas–Solid Cyclone Separators at Ambient and Elevated Temperatures. *Processes* [online]. 2020, **8**(2) [cit. 2023-03-04]. ISSN 2227-9717. Dostupné z: doi:10.3390/pr8020228
- [44] BRAR, L., R. SHARMA a R. DWIVEDI. Effect of Vortex Finder Diameter on Flow Field and Collection Efficiency of Cyclone Separators. *Particulate Science and Technology* [online]. 2015, **33**(1), 34-40 [cit. 2023-02-25]. ISSN 0272-6351. Dostupné z: doi:10.1080/02726351.2014.933144
- [45] DEMIR, Selami. A practical model for estimating pressure drop in cyclone separators: An experimental study. *Powder Technology* [online]. 2014, **268**, 329-338 [cit. 2023-02-04]. ISSN 00325910. Dostupné z: doi:10.1016/j.powtec.2014.08.024
- [46] GIMBUN, Jolius, A. FAKHRU'L-RAZI, Abdullah LUQMAN CHUAH a Thomas S. Y. CHOONG. *Prediction of the Effect of Dimension, Particle Density, Temperature, and Inlet Velocity on Cyclone Collection Efficiency* [online]. 2004 [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: doi:10.11113/jt.v40.421
- [47] KHAZAEI, Iman. Numerical investigation of the effect of number and shape of inlet of cyclone and particle size on particle separation. *Heat and Mass Transfer* [online]. 2017, **53**(6), 2009-2016 [cit. 2023-02-09]. ISSN 0947-7411. Dostupné z: doi:10.1007/s00231-016-1957-4
- [48] SANTOSH, M., Prof. SURESH a Prof. SREENIVAS RAO. CFD Analysis For Design Optimization Of Reverse Flow Type Cyclone Separator. *International Journal of Mechanical and Production Engineering (IJMPERD)* [online]. 2011 [cit. 2023-02-02]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/CFD-ANALYSIS-FOR-DESIGN-OPTIMIZATION-OF-REVERSE-Santosh-Suresh/6a9090d5edf77513b48d0b50c3c88723b05f3224#citing-papers>
- [49] KALIAPPAN, Arun, Sam KUMAR S a Ajay RAJAGOPAL. *EVALUATION OF PRESSURE DROP IN A CYCLONE SEPARATOR BY USING CFD ANALYSIS* [online]. 2019 [cit. 2023-02-03]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/332711094_EVALUATION_OF_PRE

SSURE_DROP_IN_A_CYCLONE_SEPARATOR_BY_USING_CFD_ANALYSIS

- [50] BRAR, Lakhbir, R.P. SHARMA a Khairy ELSAYED. The effect of the cyclone length on the performance of Stairmand high-efficiency cyclone. *Powder Technology* [online]. 2015, **286**, 668-677 [cit. 2023-02-05]. ISSN 00325910. Dostupné z: doi:10.1016/j.powtec.2015.09.003
- [51] GIMBUN, Jolius, T.G. CHUAH, A. FAKHRU'L-RAZI a Thomas CHOONG. The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop: a CFD study. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* [online]. 2005, **44**(1), 7-12 [cit. 2023-03-14]. ISSN 02552701. Dostupné z: doi:10.1016/j.cep.2004.03.005
- [52] MA, Liang, Qisong SHEN, Jianping LI, Yanhong ZHANG, Jingping WU a Hualin WANG. Efficient Gas-Liquid Cyclone Device for Recycled Hydrogen in a Hydrogenation Unit. *Chemical Engineering & Technology* [online]. 2014, **37**(6), 1072-1078 [cit. 2023-02-13]. ISSN 09307516. Dostupné z: doi:10.1002/ceat.201300320
- [53] SABBAH, F., M. ABDEL-HADI, S. RADWAN a A. EL-SAYED. EFFECT OF DESIGN AND OPERATING PARAMETERS ON MEASURED AND PREDICTED PRESSURE DROP IN CYCLONE. *Misr Journal of Agricultural Engineering* [online]. 2019 [cit. 2023-03-1]. Dostupné z: https://mjae.journals.ekb.eg/article_94889_4a4d770136911cc57061ca8c555045da.pdf
- [54] HUANG, An-Ni, Keiya ITO, Tomonori FUKASAWA, Kunihiko FUKUI a Hsiu-Po KUO. Effects of particle mass loading on the hydrodynamics and separation efficiency of a cyclone separator. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* [online]. 2018, **90**, 61-67 [cit. 2023-03-20]. ISSN 18761070. Dostupné z: doi:10.1016/j.jtice.2017.12.016
- [55] GIMBUN, Jolius, T.G. CHUAH, Thomas S. Y. CHOONG a A FAKHRU'L-RAZI. EVALUATION ON EMPIRICAL MODELS FOR THE PREDICTION OF CYCLONE EFFICIENCY. *Journal - The Institution of Engineers* [online]. 2006 [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: http://dspace.unimap.edu.my/bitstream/handle/123456789/13571/054-058_empirical%20models.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [56] UTIKAR, , R., DARMAWAN et al. Hydrodynamic Simulation of Cyclone Separators. In: WOO, Hyung, ed., Hyung WOO. *Computational Fluid Dynamics* [online]. InTech, 2010 [cit. 2023-03-10]. ISBN 978-953-7619-59-6. Dostupné z: doi:10.5772/7106

- [57] RAJPUT, R. K. *Engineering Thermodynamics: SI Units Version*. 3rd edition. 2010. ISBN 978-1934015148.
- [58] RUSYDI, Anna F. Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* [online]. 2018, **118** [cit. 2023-04-04]. ISSN 1755-1307. Dostupné z: doi:10.1088/1755-1315/118/1/012019
- [59] *Conductivity - Background and Measurement* [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://instrumentosdeproceso.com/wp-content/uploads/pdfs/ART2Conductivity-Background-and-Measurement.pdf>
- [60] IDIATA, David. Investigation of the Relationship between Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids for Mono-Valent, Di-Valent and Tri-Valent Metal Compounds. *International Journal of Engineering Research and Reviews* [online]. 2015 [cit. 2023-04-21].
- [61] HOLEC, Tomáš. *Plánovaný experiment* [online]. Brno, 2016 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/92799>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Josef Bednář, Ph.D.

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
DOE	Plánovaný experiment
EC	Electrical conductivity
NaCl	Chlorid sodný
TDS	Total dissolved solids

Seznam použitých symbolů

Symbol	Veličina	Jednotka
A_{in}	Plocha vstupního průřezu do cyklonu	m^2
A_o	Plocha průřezu odparky	m^2
a	Výška vstupu do cyklonu	m
B_e	Průměr dna kuželové části cyklonu	m
b	Šířka vstupu do cyklonu	m
c_p	Měrná tepelná kapacita vody	$J/(kg.K)$
D	Průměr válcové části cyklonu	m
D_e	Průměr výstupní trubky	m
d	Průměr vstupu do cyklonu	m
d_i	Průměr částice dané frakce	m
d_{50}	Mezní průměr částice	m
EC	Elektrická vodivost	$\mu S/cm$
Eu	Eulerovo číslo	–
H	Celková výška cyklonu	m
h	Výška válcové části cyklonu	m
k	Počet faktorů	–
k_f	Konverzní faktor	–
l_v	Latentní teplo vypařování	J/kg
M	Hmotnostní množství	kg
m_v	Hmotnostní průtok brýdové páry	kg/s
m_w	Hmotnostní průtok slané vody	kg/s
N	Počet obrátek vnějšího víru	–
n_e	Počet měření v centrálním bodě	–
n_f	Počet měření v okrajových bodech	–
n_s	Počet měření v axiálních bodech	–
Q	Průtok cyklonem	m^3/s
R^2	Spolehlivost modelu	%
S	Zapuštění výstupní trubky do cyklonu	m
TDS	Celkové rozpuštěné pevné látky	mg/l
T_v	Teplota brýdové páry	K
T_w	Teplota vody	K

v_{in}	Vstupní rychlost do cyklonu	m/s
v_o	Rychlost páry v odparce	m/s
x	Kódované proměnné reprezentující faktory	–
y	Hodnota odezvy	–
α	Vzdálenost od centrálního bodu	–
β	Regresní koeficienty	
β_o	Celkový průměr všech pozorování	
Δp	Tlaková ztráta	Pa
η	Celková účinnost separace	–
η_i	Frakční odlučivost	–
v	Kinematická viskozita plynu	m ² /s
ρ_d	Hustota dispergované fáze	kg/m ³
ρ_g	Hustota plynu	kg/m ³
ρ_v	Hustota páry	kg/m ³

Dolní indexy pro x a β

1	Vztahující se k faktoru A
2	Vztahující se k faktoru B
12	Vztahující se k interakci AB

Dolní indexy pro M, TDS a EC

n	Neoddělené částice
o	Oddělené částice
p	Přivedené částice na vstup
D	Destilovaná voda
K	Odloučené kapičky
P	Brýdová pára

Seznam obrázků

obr. 1: Velikost kapek způsobená různými mechanismy, upraveno [9].....	10
obr. 2: Vertikální separátor, upraveno [7].....	13
obr. 3: Horizontální separátor, upraveno [7].....	14
obr. 4: Sférický separátor, upraveno [7]	15
obr. 5: Filtrační separátor, upraveno [18]	16
obr. 6: Válcový odstředivý separátor, upraveno [20]	17
obr. 7: Mechanismy sběru kapiček, upraveno [10].....	18
obr. 8: Drátěný odlučovač svinutý do válce (vlevo) a pletený do podložky (vpravo) [22]	19
obr. 9: Princip vláknitého odlučovače, upraveno [10].....	20
obr. 10: Princip lamelového odlučovače, upraveno [23]	21
obr. 11: Princip a sestavy cyklonového odlučovače, upraveno [21].	22
obr. 12: Princip kombinovaného odlučovače, upraveno [24].....	23
obr. 13: Princip odlučovače z keramické membrány, upraveno [6].	24
obr. 14: Silová analýza kapky v cyklonu, upraveno [26]	26
obr. 15: Ilustrativní schéma cyklonového odmlžovače, upraveno [27].....	26
obr. 16: Uspořádání hlavního vtoku: a) tangenciální, b) spirálový, c) šroubovitý, (d) axiální [37]	29
obr. 17: Schéma typického cyklonu s axiálním tokem, upraveno [25].....	30
obr. 18: Zabránění strhávání kapaliny: a) oběžná dráha, b) válcový skimmer, c) kónické zakončení výstupní trubky, upraveno [29]	32
obr. 19: Mechanismy stržení kapalného filmu: a) odstřížení kapaliny z povrchu vlny, b) podříznutí hřebene vlny, upraveno [29]	33
obr. 20: Rychlostní profil tangenciální, axiální a radiální složky celkové rychlosti, upraveno [43].....	35
obr. 21: Změna účinnosti v závislosti na šířce vstupního kanálu, upraveno [46].....	36
obr. 22: Vzor proudění pro dvě různé šířky vstupu do cyklonu	37
obr. 23: Vliv tvaru a počtu vstupů na účinnost separace, upraveno [47].....	37
obr. 24: Predikce účinnosti v závislosti na průměru cyklonu, upraveno [46]	38
obr. 25: Vliv změny délky válcové a kuželové části separační komory na účinnost sběru, upraveno [50].....	39
obr. 26: Vliv rychlosti a průměru dna kužele na účinnost zachycení částic, upraveno [34]	40
obr. 27: Mapa statického tlaku v Stairmand cyklonu, upraveno [51].....	41

obr. 28: Oblasti poklesu tlaku (vlevo) a rozložení statického a celkového tlaku v cyklonu (vpravo), upraveno [29]	42
obr. 29: Vliv provozní teploty na účinnost separace, upraveno [46]	43
obr. 30: Závislost tlakového spádu na vstupní rychlosti, upraveno [51]	45
obr. 31: Závislost tlakového spádu na teplotě, geometrie cyklonu Bohnet, upraveno [51]	45
obr. 32: Účinnost separace cyklonu v závislosti na koncentraci částic v nosném plynu pro vstupní rychlosti a) 15 m/s a b) 18 m/s, upraveno [54]	46
obr. 33: Porovnání čtyř modelů pro frakční odlučivosti, upraveno [55]	48
obr. 34: Základní dimenze standardního cyklonu, upraveno [56]	49
obr. 35: Testovací cyklon.....	50
obr. 36: Schéma procesní aparatury pro ověření cyklonu	51
obr. 37: Vakuová odparka.....	52
obr. 38: Měřicí vybavení.....	53
obr. 39: Model konverze EC na TDS při 20 °C.....	55
obr. 40: Geometrické znázornění centrálně kompozitního návrhu pro dva faktory, upraveno [61].....	58
obr. 41: Vzorky (vlevo) a zásobník na odloučené kapky z cyklonu (vpravo)	61
obr. 42: Paretův diagram pro tlakovou ztrátu cyklonu	65
obr. 43: Paretův diagram pro účinnost odlučivosti cyklonu	68

Seznam grafů

graf 1: Porovnání naměřené tlakové ztráty s výpočtem dle modelů.....	64
graf 2: Přesnost modelu pro výpočet tlakové ztráty	67
graf 3: Závislost tlakové ztráty na salinitě a průtoku.....	66
graf 4: Interakce mezi faktory a tlakovou ztrátou.....	66
graf 5: Přesnost modelu pro účinnost odlučivosti.....	70
graf 6: Závislost účinnosti na salinitě a průtoku	69
graf 7: Interakce mezi faktory a účinností	70

Seznam tabulek

tab. 1: Geometrie cyklonu Bohnet o průměru 150 mm [51].....	46
tab. 2: Oblast spolehlivosti modelů pro odhad frakční odlučivosti, upraveno [55].....	48

tab. 3: Geometrie standardních cyklonových odlučovačů, upraveno [56]	49
tab. 4: Geometrie testovacího cyklonu	50
tab. 5: Kontrolní poměry testovacího cyklonu.....	51
tab. 6: Měřicí vybavení	53
tab. 7: Korelace mezi EC a TDS pro různé druhy vod, upraveno [58].....	54
tab. 8: Změřená závislost EC na TDS.....	55
tab. 9: Centrálně kompozitní plán s kódovaným značením pro dva faktory	58
tab. 10: Zvolený rozsah obou faktorů experimentu	59
tab. 11: Hmotnost a vodivost destilátu a odloučených kapiček.....	61
tab. 12: Skutečné faktory a odezvy experimentu	62
tab. 13: Skutečná hmotnost a salinita destilátu	63
tab. 14: Teoretická hmotnost a salinita destilátu.....	63
tab. 15: Podmínky pro ověření modelů na výpočet tlakové ztráty	64

Seznam příloh

Příloha 1: Vypoctovy_nastoj.xlsx – Výpočty účinnosti a tlakové ztráty cyklonu v softwaru MS Excel