



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

NÁVRH SPREJOVÉ KOLONY PRO ZACHYCENÍ CO₂

DESIGN OF A SPRAY COLUMN FOR CO₂ CAPTURE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Veselý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Cejpek

BRNO 2021

Zadaní bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Filip Veselý
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Ondřej Cejpek
Akademický rok:	2020/21

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 bakalářské práce:

Návrh sprejové kolony pro zachycení CO₂

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Snahou evropské unie je snížení produkce skleníkových plynů. Hlavním skleníkovým plynem je CO₂. Jeden z možných způsobů zachycení CO₂ z odpadních plynů energetických zařízení je použití sprejové kolony. Toto zařízení poskytuje mnoho výhod: jednoduchá, levná konstrukce, nízké provozní náklady, použití pro různé zdroje a mnoho dalších. Cílem práce je seznámit se s problematikou sprejových kolon, popsat a srovnat jednotlivé konstrukční varianty a provést ideový návrh laboratorní sprejové kolony pro výzkum vlivu atomizace na proces zachycení CO₂. Komora by měla umožňovat měření uvnitř kolony pomocí optických měřících metod používaných v laboratořích sprejů (LDA, PDA, vysokorychlostní vizualizace).

Cíle bakalářské práce:

1. Seznámit se s různými konstrukcemi laboratorních sprejových kolon
2. Popsat hlavní části laboratorní absorpční sprejové kolony
3. Zhodnotit výhody a nevýhody jednotlivých komponent
4. Provést ideový návrh absorpční laboratorní sprejové kolony s ohledem na měřicí přístroje

Seznam doporučené literatury:

RACKLEY, S. A., Carbon Capture and Storage, Burlington: Elsevier, 2010

LEFEBVRE, A. H., a V. G. McDONELL, Atomization and sprays, CRC press, 2017

ZHANG, Z., LDA Application Methods: Laser Doppler Anemometry for Fluid Dynamics, Springer, 2010

DARDE, V., CO₂ capture using aqueous ammonia, Kongens Lyngby, Disertační práce, DTU Chemical Engineering, 2011

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá způsoby, jakými lze zachytit CO₂ vznikající v energetice a průmyslových závodech a omezit tím jeho koncentraci v atmosféře. Práce se věnuje především technologii čištění spalin po spalování pomocí sprejových kolon. Po rešerši separačních procesů a již provedených experimentech jsou uvedeny výhody a nevýhody jednotlivých řešení. Následuje rešerše jednotlivých komponent laboratorní sprejové kolony, jejich zhodnocení a výběr nejlepšího řešení. Hlavním výstupem práce je poté vlastní ideový návrh laboratorní sprejové kolony, který je dimenzován pro použití na Fakultě strojního inženýrství v laboratoři sprejů k dalšímu výzkumu. Návrh byl proveden s ohledem na optické experimenty se sprejem, bylo uvažováno s prostorovými možnostmi laboratoře a použitelnými finančními zdroji.

KLÍČOVÁ SLOVA

Laboratorní sprejová kolona, Separace CO₂, CCS

SUMMARY

This work deals with methods of CO₂ separation from flue gases in energy industry and industrial processes in order to reduce CO₂ concentration in the atmosphere. Bachelor thesis discusses the post-combustion CO₂ capture using spray columns. After literature review of separation processes and experiments conducted before, advantages and disadvantages of separation processes are discussed. The following part of bachelor thesis is dedicated to the analysis of spray column components. At the end of this chapter the suitable components are chosen and designed. The main outcome of the work is a conceptual design of a spray column. Spray column is designed for research purposes at Faculty of Mechanical Engineering in spray labs. In the design procedure main aim was devoted to suitable spray columns design for optical experiments. During the spray column design the space requirements of the laboratory and economic of the design need to be accounted.

KEYWORDS

Experimental setup of spray column, CO₂ separation, CCS

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VESELÝ, Filip. *Návrh sprejové kolony pro zachycení CO₂* [online]. Brno, 2021. 49 s. [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132154>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Ondřej Cejpek.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Ondřeje Cejпка a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 21. května 2021

.....

Filip Veselý

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Ondřejovi Cejpkovi za trpělivost, čas a cenné rady poskytnuté během tvorby této práce.

Realizace této bakalářské práce byla podpořena z projektu Česko-Indické spolupráce č. LTAIN19044 programu INTER-EXCELLENCE, podprogramu INTER-ACTION.

OBSAH

Úvod	11
1 Technologie separace CO ₂	12
1.1 Separace CO ₂ před spalováním.....	12
1.2 Separace CO ₂ po spalování.....	13
1.3 Absorpční systémy.....	13
2 Sprejové kolony	18
2.1 Laboratorní sprejová kolona – University of Oklahoma	18
2.2 Laboratorní sprejová kolona s variabilním průměrem.....	20
2.3 Laboratorní sprejová kolona s dvoumédiovým sprejem.....	21
2.4 Laboratorní sprejová kolona s monodisperzním atomizérem.....	22
3 Hlavní komponenty laboratorní sprejové kolony	24
3.1 Tryska	24
3.2 Kolona.....	25
3.3 Měřicí přístroje	26
3.4 Demistér.....	27
3.5 Usměřňovač	28
3.6 Rozptylovač	29
3.7 Pohon	29
3.8 Ohřívač.....	31
3.9 Zdroje CO ₂	31
4 Ideový návrh sprejové kolony	33
4.1 Tělo kolony	33
4.2 Cyklonový demistér.....	34
4.3 Tryska	35
4.4 Ohřívač.....	36
4.5 Radiální ventilátor.....	38
4.6 Tlakové ztráty aparatury	38
4.7 Zdroj CO ₂ a jeho koncentrace.....	41
4.8 Měření průtoku	41
4.9 Optické měřicí systémy	42
4.10 Ekonomická bilance kolony	42
4.11 Sestavení laboratorní aparatury.....	43
Závěr.....	44
Seznam použitých zkratk a symbolů	48

ÚVOD

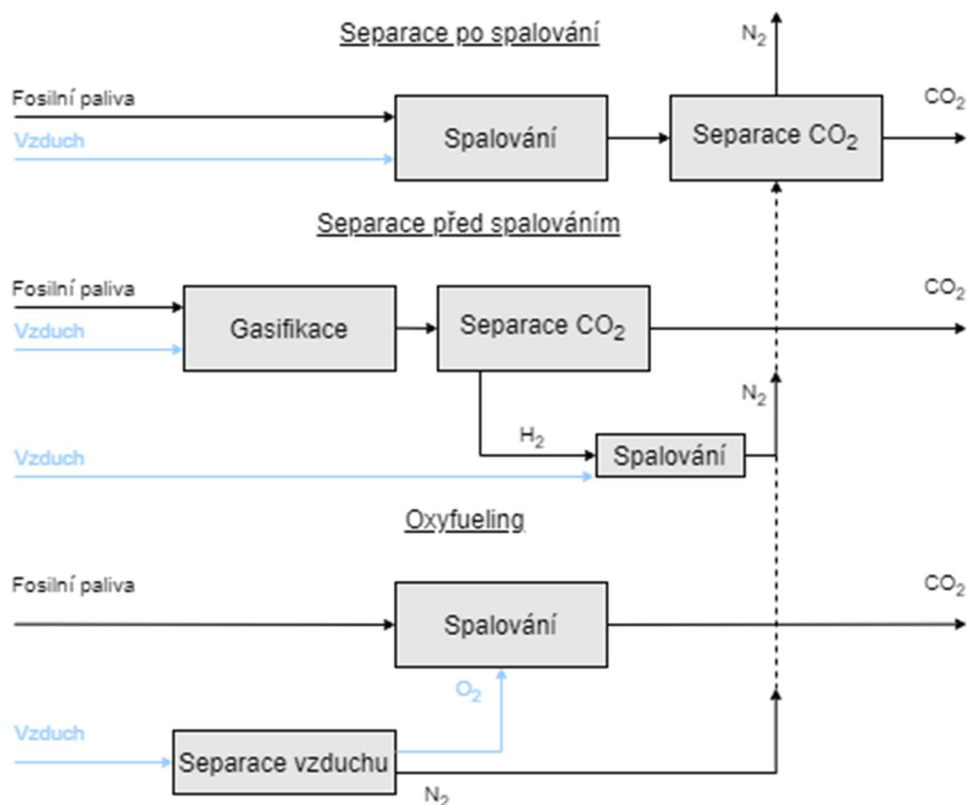
Globální oteplování je problém, který společnost intenzivně trápí poslední půlstoletí a v 21. století se bude s rostoucí lidskou průmyslovou činností zrychlovat. Globální oteplování je způsobeno skleníkovými plyny, které způsobují tzv. skleníkový efekt. Tento jev nastává, když skleníkové plyny v atmosféře absorbují tepelné záření ze Zemského povrchu a vyzařují ho zpět (zabraňují tepelnému záření uniknout z atmosféry). Nejvíce se na tomto efektu podílejí: voda (H₂O), oxid uhličitý (CO₂), methan (CH₄), ozón (O₃), oxid dusný (N₂O) atd. Přebytkem těchto plynů v atmosféře je značně ovlivněno klima na celé planetě a je ohrožena existence mnoha živočichů. Dlouhodobou snahou Evropské Unie je snížit produkci skleníkových plynů vypouštěných do atmosféry a tím zpomalit nebo úplně zastavit globální oteplování.

Oxid uhličitý přispívá ke globálnímu oteplování nejvíce. Do atmosféry je uvolňován spalováním fosilní paliv (uhlí, ropa, zemní plyn, biomasa), v průmyslu a z dopravy. Snížení emisí CO₂ můžeme dosáhnout omezením používání fosilních paliv a jejich nahrazením alternativními palivy nebo zachycováním CO₂ (Carbon Capture and Storage, dále jen CCS) přímo v průmyslových procesech. Technologie CCS může být použita ve spalovacích elektrárnách, při spalování biomasy, v průmyslové výrobě vodíku, čpavku, železa, oceli a cementu. Zachycený CO₂ je následně transportován a skladován v nádržích, kde by měl zůstat v řádu desítek až stovek let. CCS je považována za slibnou strategii, jak efektivně snížit uhlíkovou stopu, aniž by se muselo omezit spalování fosilních paliv.

Tato práce se zaměřuje na zachycování CO₂ bezprostředně po spalování, konkrétně chemickou absorpcí ve sprejových kolonách. Sprejové kolony mají potenciál být komerčním řešením CCS díky své nízké ceně, jednoduché konstrukci a snadné implementaci do již existujících elektráren a průmyslových provozů. Bohužel na toto téma vzniklo jen několik studií, které zatím zcela neobjasnili chování spreje ve sprejové koloně a vliv jednotlivých parametrů na účinnost zachycení CO₂. Cílem této práce je tedy navrhnout laboratorní sprejovou kolonu, která bude sloužit k testování trysek a absorpčního procesu za různých okrajových podmínek.

1 TECHNOLOGIE SEPARACE CO₂

Základní chemickým procesem, vyskytujícím se ve spalovacích elektrárnách, které používají uhlíkové palivo, je exotermická oxidace uhlíku. Protože CO₂ má nejnižší energii ze všech produktů tohoto procesu, jeho produkce je nevyhnutelná [1]. Řešením může být použití jednoho ze tří základních mechanismů odstranění CO₂. Zbavit palivo uhlíku (dekarbonizovat) ještě před samotným spalováním (pre-combustion capture), očistit vzniklé spaliny od CO₂ před vypuštěním do atmosféry (post-combustion capture) nebo použít ke spalování čistý kyslík (oxyfueling). Výsledné produkty spalovacího procesu s čistým kyslíkem budou CO₂ a pára, kterou lze snadno oddělit kondenzací a vzniklý suchý plyn CO₂ může být rovnou stlačen a transportován ke skladování nebo dalšímu průmyslovému užití [1].



Obrázek 1: Základní technologie zachycování CO₂ [1]

1.1 SEPARACE CO₂ PŘED SPALOVÁNÍM

Principem této metody je dekarbonizace tzv. zplyňováním (gasifikací) paliva, většinou uhlí nebo biomasy. Při tomto procesu vzniká částečnou oxidací uhlíku směs CO a H₂ zvaná SYNGAS. Přidáním vody je vyvolána reakce, při které vzniká CO₂ a H₂. K oddělení CO₂ od H₂ se nejčastěji používají fyzikální absorpce, přičemž separace je mnohem snazší než u odstraňování CO₂ po spalování díky většímu rozdílu molárních hmotností a velikostí molekul, než je toho u CO₂ a N₂ [1]. Největší výhodou této technologie je nižší energetická náročnost, avšak vznikají problémy s teplotou a účinností spojené s turbínou, kde se spaluje H₂ [1].

1.2 SEPARACE CO₂ PO SPALOVÁNÍ

V této metodě se CO₂ separuje ze spalín, vzniklých spalováním ve spalovací komoře, před vypuštěním do atmosféry. Používají se různé separační systémy, jako jsou absorpční, adsorpční, membránové a destilační systémy nebo minerální karbonizace [1]. Práce se bude zabývat absorpčními systémy dopodrobna níže.

ADSORPČNÍ SYSTÉMY

Při absorpci se absorbovaná látka dostane do objemu absorbéru a je v něm rozpuštěna. Adsorpce využívá toho, že adsorbované molekuly zůstávají na povrchu adsorpční látky a jsou vázány chemickou nebo fyzikální vazbou. Tento systém může využívat látek, které jsou pevné a tím dovolují pracovat i v širokém rozmezí teplot. Likvidace odpadu, který při procesu vzniká, je daleko snazší [1].

MEMBRÁNOVÉ SYSTÉMY

Tenká vrstva kompozitových membrán se chová jako filtr, který odděluje komponenty ze směsi látek. V závislosti na materiálu a struktuře membrány probíhá při tomto procesu několik fyzikálních a chemických procesů. Membrány mají mnoho využití, zejména v aplikacích separace před spalováním (separace H₂) a separace CO₂ při aplikacích po spalování [1].

DESTILAČNÍ SYSTÉMY

Separace touto metodou spočívá v rozdílných teplotách varu a mírou těkavosti. Tento systém lze efektivně použít pro produkci kyslíku kryogenní separací vzduchu, oddělení CO₂ ze zemního plynu a v ropném průmyslu [1].

MINERÁLNÍ KARBONIZACE

Produktem není čistý plynný CO₂, ale látka, která je chemicky stabilní. Tyto látky jsou snadněji skladovatelné pro delší časový úsek (>100 000 let) [1].

1.3 ABSORPČNÍ SYSTÉMY

Separace CO₂ ze spalín spočívá ve fyzikální nebo chemické absorpci molekul CO₂ pomocí rozpouštědla, které je buď inertní a absorbuje CO₂ do svého objemu bez chemické reakce nebo tvoří s CO₂ chemické sloučeniny, které jsou následně separovány zvlášť.

CHEMICKÁ ABSORPCE

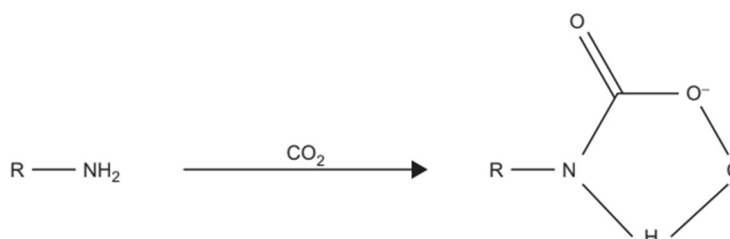
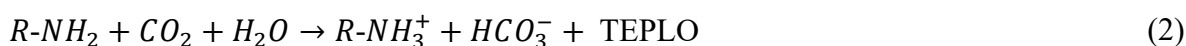
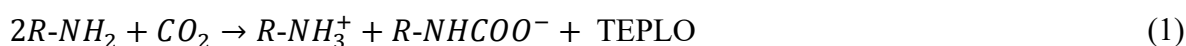
Sprejové kolony využívají chemických procesů, z tohoto důvodu je v této kapitole podrobněji popsána pouze chemická absorpce. Chemická absorpce je založena na exotermní reakci rozpouštědla s CO₂. Děj většinou probíhá za nízkých teplot. Reakce je následně provedena opačným směrem za vysokých teplot v procesu, kterému se říká regenerace. Tento typ absorpce je nejideálnější k zachytávání CO₂, který má nízký parciální tlak a jako nejpoužívanější rozpouštědla se používají aminy a uhličitany [1].

ABSORPCE POMOCÍ AMINU

Aminy jsou organické sloučeniny odvozené od amoniaku (NH₃), ve kterém došlo k nahrazení jednoho nebo více atomů H jiným atomem či skupinou atomů. Podle počtu substitucí atomů H se aminy dělí na primární, sekundární a terciální. Pro snazší popis a přehlednost, se substituovaná část značí písmenem R, z toho plyne, že:

- Primární aminy – R^I-NH₂
- Sekundární aminy – R^{II}-R^I-NH
- Terciální aminy – R^{III}-R^{II}-R^I-N

Nejčastěji používaným aminem pro absorpci CO₂ je MEA¹, primární amin se substitucí R = CH₂CH₂OH. Pokud se rozpustí ve vodě a vznikne vodný roztok, chová se MEA jako slabá zásada, která dokáže zneutralizovat CO₂². V chemické reakci potom vzniká karbamát (1), přičemž teplo, které při reakci vzniká je 2 MJ na kilogram CO₂. Při rozpouštění CO₂ dochází k dalším dvěma reakcím (2) a (3), které mají minimální příspěvek k celému procesu absorbování [1].



Obrázek 2: Struktura karbamátového iontu [1]

Po absorbování jsou výsledné sloučeniny odvedeny pryč z absorpční kolony a přivedením dostatečného množství tepla se směs regeneruje. Po regeneraci máme pouze CO₂ (které lze nadále samostatně zpracovat) a MEA, který lze znovu využít k opětovné absorpci. Podle rovnice (1) lze teoreticky zachytit až 1 mol CO₂ pomocí 2 molů absorpční látky MEA. Při použití vodného roztoku, podle rovnice (2), lze dosáhnout dvakrát efektivnější absorpce (1 mol CO₂ na 1 mol MEA) [1].

U procesu absorbování jsou vyžadovány tři základní vlastnosti procesu – rychlost reakce, nízká regenerační energie a vysoká kapacita absorpční látky. Rychlost reakce a regenerační energie klesají chronologicky s rostoucím počtem substitucí H (primární aminy = nejvyšší rychlost, terciální = nejnižší energie). Pro dosažení nejlepších vlastností se využívají absorpční látky smíšené, např. urychlení terciální reakce přidáním sekundárního aminu. Aminy, v přítomnosti kyslíku, podléhají degradačním procesům, přičemž primární aminy jsou k tomuto chování nejcitlivější. Tyto reakce vedou k tvorbě kyseliny mravenčí a amoniaku. V případě, že se

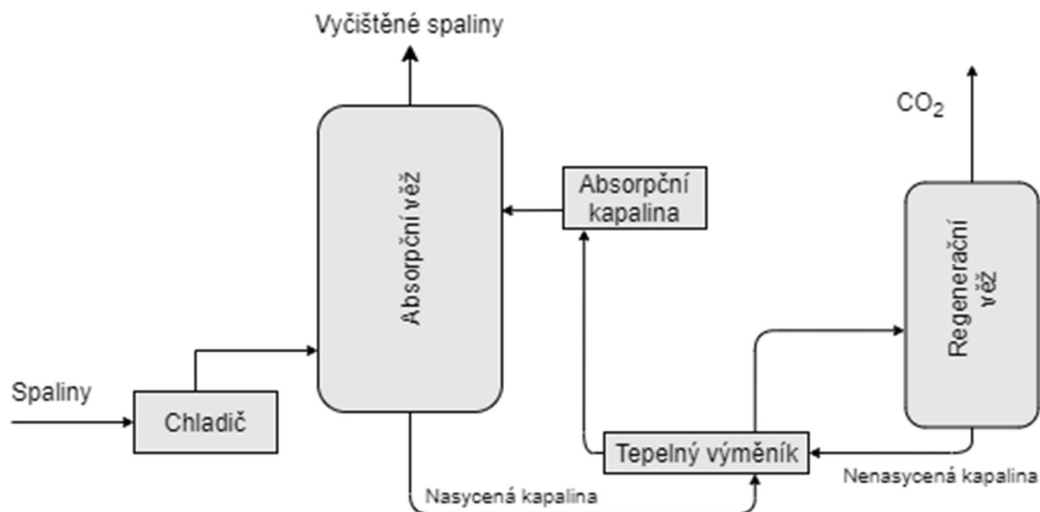
¹ monoethaloamin

² CO₂ rozpuštěný ve vodě je kyselý, protože tvoří HCO₃⁻

v absorpční látce vyskytují SO₂ a NO₂, reakcí s aminy mohou vznikat také tepelně stabilní soli (sulfáty a dusičnany), které vedou ke snížení celkové absorpční kapacity [1].

ABSORPČNÍ PROCES POMOCÍ AMINŮ

Celé zařízení pro separaci CO₂ se skládá z chladičů, tepelných výměníků a dvou kolon. V jedné koloně probíhá absorpce CO₂ (absorpční kolona) a v druhé regenerace (regenerační kolona). Spaliny jsou před vstupem do absorpční kolony ochlazovány v chladiči na teplotu 40 – 60 °C. Následně spaliny vstupují do absorberu v jeho spodní části s tlakem blízkým tlaku atmosférickému. Pokud je ochlazování realizováno přímým kontaktem s vodou, může navíc dojít k očištění spalin od nežádoucích složek (popel, prach a další pevné částice). V absorpční koloně přichází spaliny do kontaktu s absorpční látkou a dochází k absorpci dle mechanismů popsaných dříve. Očištěné spaliny opouští absorpční kolonu a jsou vypuštěny do atmosféry. Produkty reakce (absorbované CO₂) pokračují do tepelného výměníku, kde je látce dodáváno teplo, potřebné k regeneraci. Samotný regenerační proces probíhá v regenerační koloně, která operuje při teplotách 100–140 °C za vyššího tlaku. Zregenerované CO₂ opouští regenerační kolonu ve vrchní části. Proces opouští čistý CO₂, který se stlačí na tlak, při kterém se vyskytuje v kapalném stavu a je dále transportován. Zregenerovaná absorpční látka je přivedena zpět přes tepelný výměník do absorpční kolony a celý cyklus probíhá znovu [1].



Obrázek 3: Schéma separace CO₂ [1]

Účinnost celého procesu zachycování CO₂ bývá průměrně 90 %, přičemž proces separace CO₂ po spalování může zapříčinit značné snížení účinnosti celé elektrárny v jednotkách procent [2]. Proto je důležité správně zakomponovat CCS do již existujících elektráren a provozů, aby všechny dílčí procesy probíhaly co nejefektivněji. Přidruženým problémem této technologie je těkavost MEA a její možný únik do atmosféry [1]. Tímto problémem se však tato práce dále nezabývá.

ABSORPCE POMOCÍ VODNÉHO ROZTOKU AMONIAKU

Reakce amoniaku s CO₂ produkují méně tepla než reakce s aminy. Tím lze docílit značného zlepšení účinnosti celého procesu a snížení výdajů na provoz. Vodný roztok uhličitanu amonného ((NH₄)₂CO₃) reaguje s CO₂ a vodou a tvoří hydrogenuhličitan amonný (4):



Čištění spalin pomocí amoniaku se používá i pro separaci SO₂ a NO₂. Používání amoniaku k separaci CO₂ by umožnilo používat jedinou absorpční látku pro zachycení CO₂, SO₂ a NO_x a tím usnadnit i zlevnit chod celé elektrárny. Existují dvě varianty, jak CO₂ separovat za pomoci amoniaku. První varianta se provádí za snížených teplot (0–10 °C) a je označována jako CAP³. Snížením teploty se snižuje množství amoniaku vypouštěného do okolí [2]. Navíc je umožněno srážení (precipitace) uhličitanů amonných v absorbéru, které se využívají jako hnojivo. Druhá varianta pracuje za teplot ≈ 40 °C a vyhýbá se precipitací [2].

Technologie CAP byla patentována v roce 2006 a celý proces probíhá v několika krocích. Podstatou je zachytit CO₂ při nízké teplotě, tzn. spaliny vstupující do procesu musí být ochlazovány na potřebnou teplotu (0–10 °C) přímými chladiči na vstupu do kolony. Nízká teplota snižuje tlak par a způsobuje jejich kondenzaci. Dále spaliny vstupují do separačního systému, skládající se z absorbéru a regenerátoru (analogicky jako u aminů). Proud plynu, opouštějící absorbér, obsahuje velké množství amoniaku, a proto musí být očištěn vodou. Čištění probíhá analogicky k separaci CO₂ pomocí absorbéru a regenerátoru. Odstraňování amoniaku je taktéž prováděno při nízkých teplotách [2].

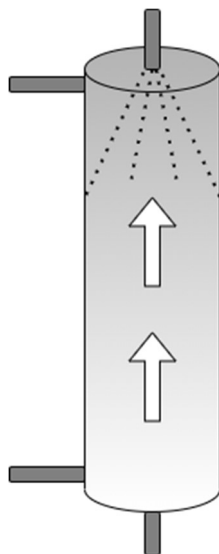
³ Chilled ammonia process = proces s chlazeným amoniakem

Tabulka 1: Srovnání jednotlivých absorpčních látek

Absorpční látka	Výhody	Nevýhody
MEA	<ul style="list-style-type: none"> • Značně otestovaná technologie s komerčním využitím • Levnější varianta CCS 	<ul style="list-style-type: none"> • Nízká tolerance vůči SO₂, NO_x a O₂ ve spalinách • Vysoká energie potřebná k regeneraci
Vodný roztok amoniaku	<ul style="list-style-type: none"> • Nízká regenerační energie • Tolerantní vůči O₂ • Nízká cena absorpční látky • Možnost produkovat hnojivo jako vedlejší produkt • Nedochází k degradaci absorpční látky během absorpčního a regeneračního cyklu 	<ul style="list-style-type: none"> • Vysoká těkavost • Velká ztráta absorpční látky při regeneraci při vyšších teplotách
Ochlazený amoniak	<ul style="list-style-type: none"> • Nedochází k degradaci absorpční látky během absorpčního a regeneračního cyklu • Nízká regenerační energie 	<ul style="list-style-type: none"> • Pracování za velmi nízkých teplot kvůli omezení ztrát absorpční látky • Zanášení pevnými látkami hydrogenuhličitanu amonného

2 SPREJOVÉ KOLONY

Absorpčních kolon (resp. věží) existuje celá řada, kde každá funguje na jiném principu. Společným cílem kolon je absorbovat co nejvíce CO_2 s co největší účinností. Tato práce se bude zabývat sprejovou absorpční kolonou, která je svou konstrukcí nejjednodušší ze všech typů. Sprejové kolony mají velký potenciál být levnou a efektivní aplikací pro velké zdroje spalin (elektrárny, cementárny aj.). Kolona má zpravidla cylindrický tvar, ve spodní části se vstupem spalin. Ve vrchní části se nachází soustava trysek, které vstříkují absorpční látku do proudu spalin, čímž se celý absorpční proces značně zefektivní. Absorpční kapalina je tryskou rozptýlena do kuželového tvaru, čímž zabírá v koloně veškerou plochu a spaliny tak vždycky přijdou do kontaktu s kapalinou a nedochází ke ztrátám na účinnosti. Návrh kolony je velice empirický a závisí především na konkrétní aplikaci. Díky absenci dalších komponent uvnitř kolony, je kolona odolnější vůči korozi a lze použít vyšší koncentrace absorpční látky. Po absorpci CO_2 steče absorpční látka do dolní části kolony, kde je přečerpána čerpadlem do tepelného výměníku a následně do regenerační věže. Nejrozšířenější absorpční látkou používanou ve sprejových kolonách je 30% roztok MEA s vodou [4]. Použití větších koncentrací je nežádoucí z toho důvodu, že MEA se po absorpci CO_2 stává velice korozivní látkou. Velikou výhodou sprejových kolon je to, že dokážou lépe pracovat s absorbenty, které mají tendenci se po absorpci vysrážet a tím ucpat filtry apod. [4]. V následující podkapitole budou představeny různé konstrukce laboratorních sprejových kolon.



Obrázek 4: Schématický obrázek sprejové kolony

2.1 LABORATORNÍ SPREJOVÁ KOLONA – UNIVERSITY OF OKLAHOMA

Tento laboratorní model sestrojili akademici na univerzitě v Oklahomě v roce 2015. Sestava se skládá ze sprejové kolony, zásobovací a jímací nádrže, čerpadla, ventilátoru, trysky, zásobníku CO_2 , měřiče rychlosti a velikosti kapek⁴ a měřiče množství CO_2 na vstupu i výstupu z kolony. Obsah CO_2 v absorpční kapalině se nadále měří pomocí infračerveného analyzátoru na vzorkách odebíraných po absorpci [4] [6].

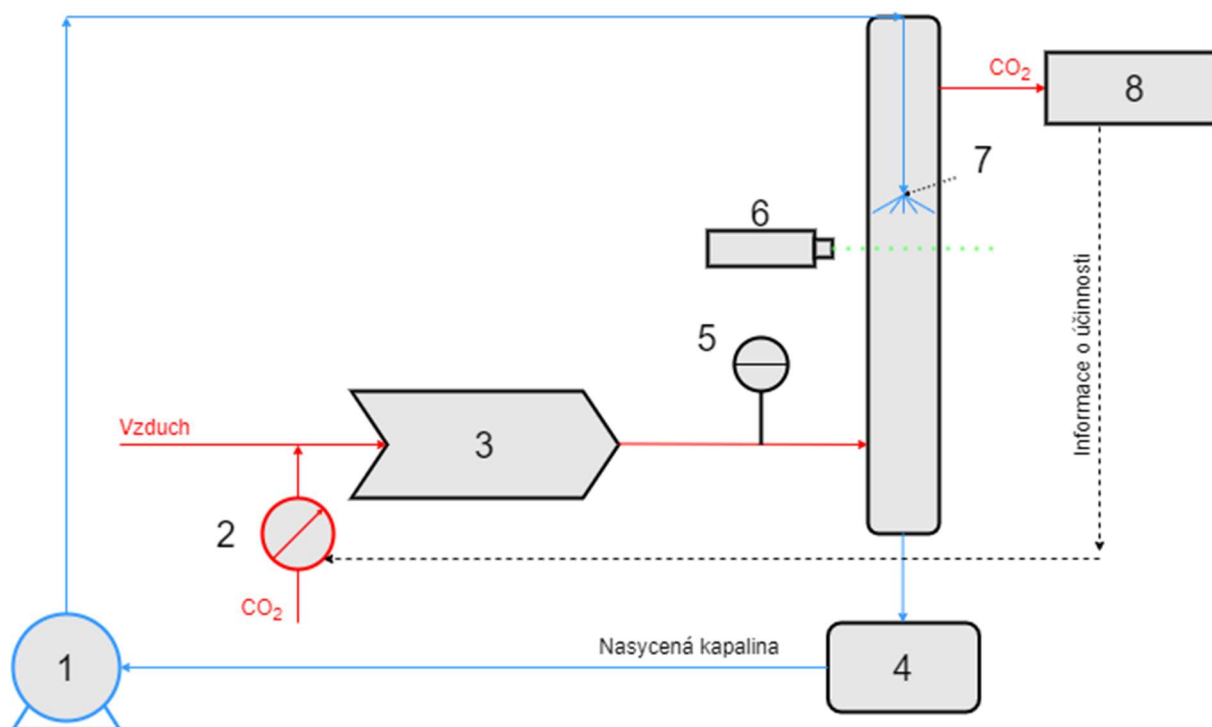
⁴ Fázový Dopplerovský Interferometr = Phase Doppler Interferometer = PDI systém

Sprejová věž je vyrobena z borosilikátového skla a je rozdělena na 9 sekcí, přičemž průměr kolony je 20,27 cm a její celková výška je 3,7 m. Ve spod kolony je sběrač, který minimalizuje kontakt nasycené kapaliny s plynem. Tryska je ukotvena v geometrickém středu kolony. Spaliny jsou zde simulovány smícháním vzduchu z místnosti s CO₂ ze zásobníku. Rychlost spalin je měřena průtokoměrem. Objemový průtok absorpční kapaliny přicházející do trysky je měřen pomocí rotametrů. Objemový tok výsledného plynu je udržován konstantní během celého měření. Při experimentu se používala směs obsahující 12 % CO₂. Tohoto podílu se dosahuje regulací dodávání CO₂ ze zásobníku a frekvencí otáčení větráku (regulace podílu vzduchu) [4] [6].

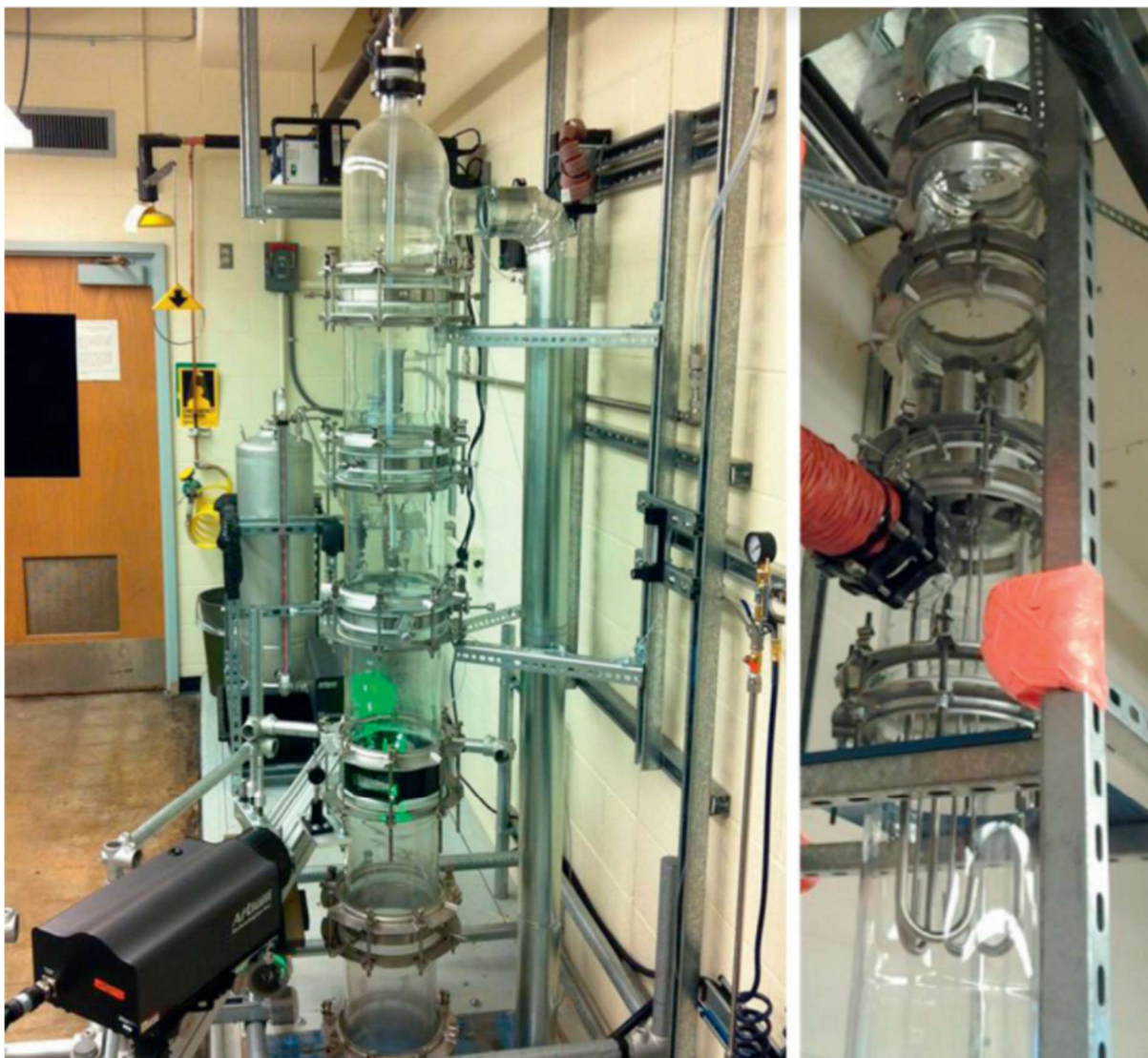
Tabulka 2: Parametry laboratorní sprejové kolony – University of Oklahoma [4], [6]

Tryska	Kuželová, 53°, 3 atm
Absorpční látka	30 % a 40 % MEA s vodou
Teplota spalin	30 °C
Tok kapaliny ($\times 10^4$)	7,6 – 11,4 m ³ /min
Tok spalin	19,75 m ³ /h
Koncentrace CO ₂	12 %
Rychlost plynu	0,17 m/s

U tohoto laboratorního modelu není regenerátor, kapalina se po absorpci vrací do zásobníku a je znovu použita k absorpci a nasycení absorbéru se zvětšuje každým cyklem absorpce.



Obrázek 5: Schéma laboratorní sprejové kolony University of Oklahoma – 1. Čerpadlo, 2. Variátor koncentrace CO₂, 3. Ventilátor, 4. Kolektor nasycené kapaliny, 5. Průtokoměr, 6. PDI, 7. Tryska, 8. Měřič koncentrace CO₂ [4]



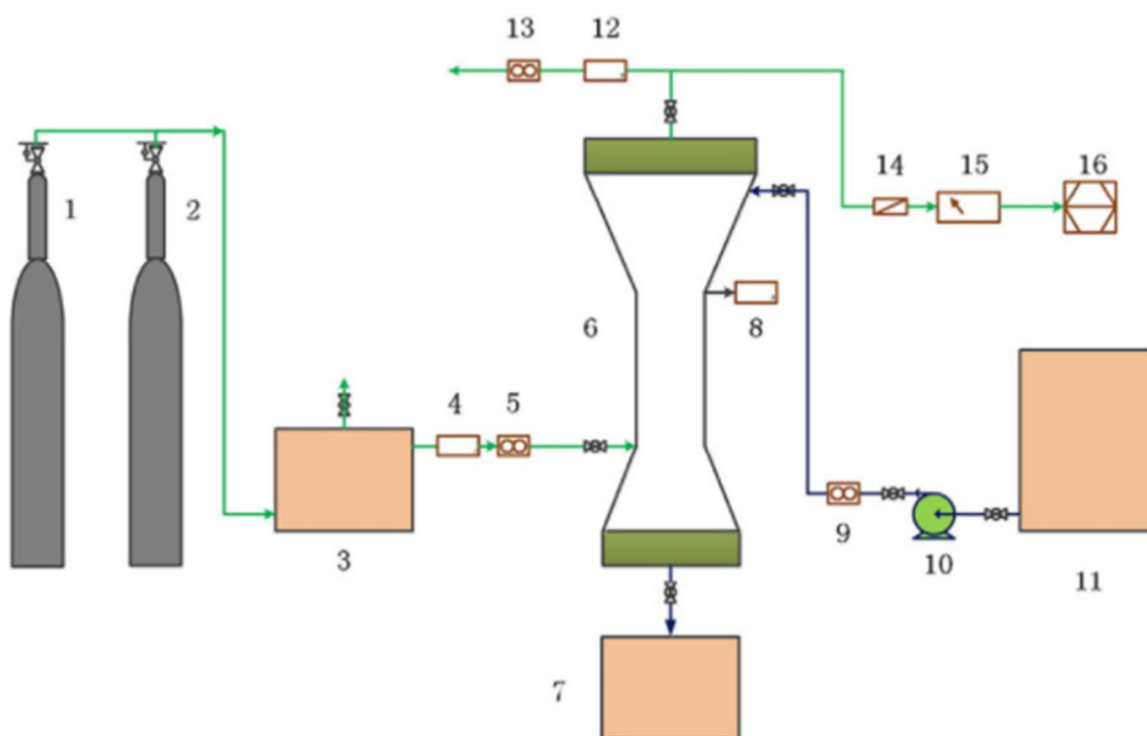
Obrázek 6: Fotografie laboratorního aparátu (schéma viz Obrázek 5) [4], [6]

2.2 LABORATORNÍ SPREJOVÁ KOLONA S VARIABILNÍM PRŮMĚREM

U následující kolony se ke konstrukci kolony přistoupilo jinak. Podle starších prací a experimentů se válcová sprejová kolona s jednou tryskou zdála nedokonalá pro komerční využití. Proto zde byla použita kolona s variabilním průměrem a dvěma tryskami. Trysky se nacházejí v horní části kolony a stříkají chemickou látku proti sobě. Uprostřed věže se proudy srážejí a vznikají menší kapičky. Díky tomuto řešení se zvětšuje míra zachycení CO_2 během absorpce. Celková výška kolony je 0,785 m, v nejužším místě má průměr 12 cm. Spaliny jsou zde simulovány smíšením N_2 a CO_2 , které jsou dodávány z tlakových lahví. Před vstupem do kolony jsou plyny míchány ve směšovací nádrži, aby se zajistilo rovnoměrné smíšení. Plyn vstupuje do věže v dolní části dvěma otvory. Koncentrace CO_2 je měřena na vstupech i výstupech z kolony infračervenými analyzátory. Před měřením koncentrace je „vyčištěný“ plyn, který je odváděn v horní části kolony, vysušen pomocí bezvodého silikagelu [5].

Tabulka 3: Parametry laboratorní kolony s variabilním průměrem [5]

Tryska	Ø 0,5 mm, 60°
Absorpční látka	MEA 10 – 40 % roztok s vodou
Teplota spalin	20 °C
Tok kapaliny ($\times 10^4$)	6,67 – 20 m^3/min
Tok spalin	1 – 5 m^3/h
Koncentrace CO ₂	8 – 18 %
Tlak	1 atm



Obrázek 7: Schéma laboratorní sprejové kolony s variabilním průměrem – 1. Tlaková nádoba N₂; 2. Tlaková nádoba CO₂; 3. Směšovací komora; 4,8,12. Měřidla tlaku; 5,13. Průtokoměry; 6. Sprejová kolona; 7. Kolektor kapaliny; 9. Průtokoměr kapaliny; 10. Čerpadlo; 11. Nádrž s kapalinou; 14. Vysoušecí věž; 15. Měřidlo koncentrace CO₂; 16. Počítač vyhodnocující výsledky [5]

2.3 LABORATORNÍ SPREJOVÁ KOLONA S DVOUMÉDIOVÝM SPREJEM

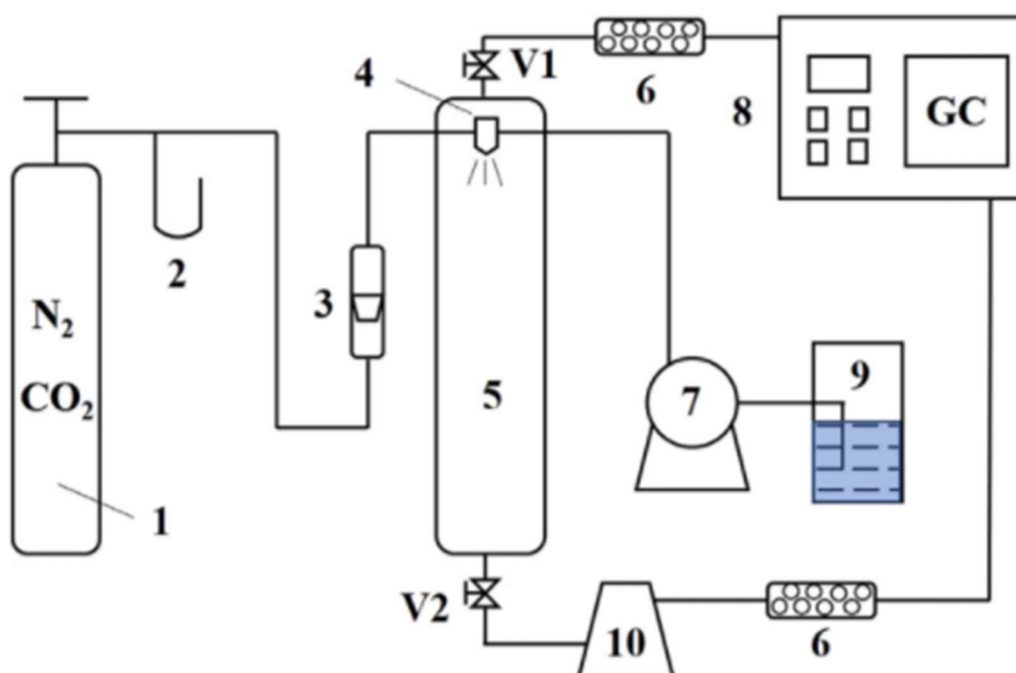
U tohoto experimentu byla použita dvoumédiová tryska. Tlakové trysky, které byly používány v případech zmíněných výše, rozstříkávaly kapalinu s velikou rychlostí do okolní plynné atmosféry. Do dvoumédiové trysky vstupují dvě média. Pomalou rychlostí proudící kapalina je rozstříkována proudem spalin o vysoké rychlosti. Jejich velkou výhodou je provoz za nízkých tlaků a kvalita generovaného spreje, navíc dokážou spolehlivě pracovat s kapalinami o vyšší viskozitě. [7] Spaliny jsou zde simulovány směsí N₂ a CO₂ [7].

Sprejová kolona byla zkonstruována z akrylátového skla s vnitřním poloměrem 0,1 m a výškou 1,5 m. Ve vrchní části kolony v jejím geometrickém středu se nachází tryska. Tlak a objemový průtok spalin jsou před vstupem do kolony měřeny manometrem ve tvaru U a rotametrem. Absorpční kapalina, testovány byly NaOH a MEA, je čerpána do trysky ze zásobníku. Koncentrace CO₂ na výstupu je měřena chromatografem, nejprve je plyn vysušen ve vysoušecí

trubce s bezvodým chloridem vápenatým. Spaliny opouštěly kolonu ve vrchní, respektive spodní části a měřila se účinnost absorpce v obou případech [7].

Tabulka 4: Parametry laboratorní sprejové kolony s dvoumédiovým sprejem [7]

Tryska	Dvoumédiová ⁵
Absorpční látka	MEA, NaOH
Teplota spalin	Pokojevá teplota
Tok kapaliny ($\times 10^4$)	0,0833 m^3/min
Tok spalin	0.2, 0.4, 0.6, 0.8 m^3/h
Koncentrace CO ₂	3, 9.5 %
Tlak	30–65 kPa



Obrázek 8: Schéma laboratorní sprejové kolony s dvoumédiovým sprejem– 1. Tlaková lahev s CO₂/N₂ směsí; 2. Manometr ve tvaru U; 3. Rotametr; 4. Tryska; 5. Sprejová kolona; 6. Vysoušecí trubka s bezvodým chloridem vápenatým; 7. Čerpadlo; 8. Plynová chromatografie; 9. Zásobník absorpční kapaliny; 10. Oddělovací komora plyn–kapalina; V1, V2. Uzávěry [7]

2.4 LABORATORNÍ SPREJOVÁ KOLONA S MONODISPERZNÍM ATOMIZÉREM

Konvenční trysky produkují kapky nejednotné velikosti a různého velikostního rozložení kapiček, proto se v tomto experimentu testovala tryška monodisperzní. Tato tryška se skládá z desky, která obsahuje několik mikrotrysek, které produkují kapky absorpční látky téměř stejné velikosti a zároveň zajišťuje rovnoměrnou distribuci kapek v koloně. Díky tomu značně roste účinnost absorpčního procesu. Další výhodou je tryskání absorbentu svisle dolů a neulpívání kapek na stěnách kolony. Nadále nedocházelo k otočení směru pohybu kapek v důsledku proudu spalin díky ideální velikosti kapek [8].

⁵ Detail tryšky nebyl blíže specifikován.

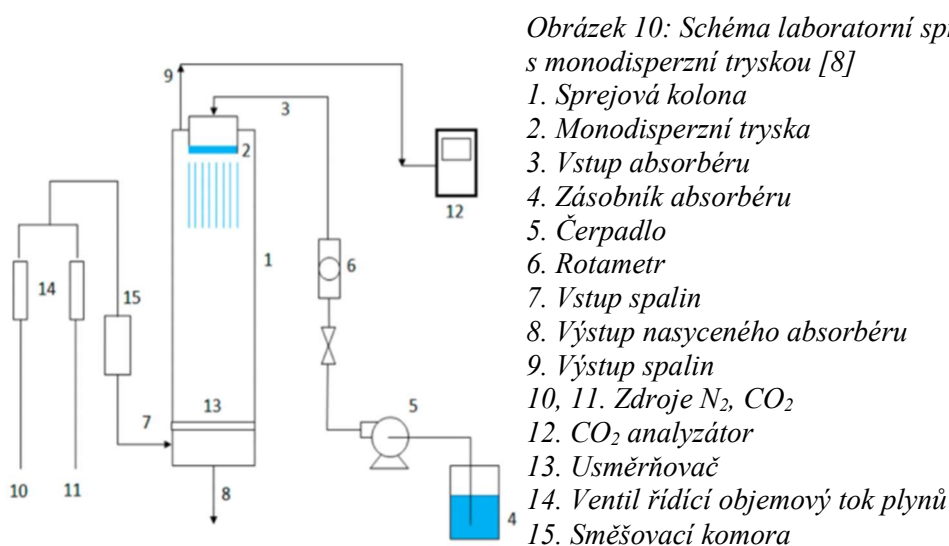


Obrázek 9: Detailní fotografie monodisperzní trysky [8]

Experimentální aparatura se skládala z jednoduché, válcové kolony z průhledného polykarbonátu s monodisperzní tryskou. Ve vrchní části byla tryska napojena na nádrž s absorpční kapalinou. Kolona byla vysoká 1,5 m s průměrem 11,5 cm. V tomto experimentu byl použit vodný roztok amoniaku. Spaliny byly simulovány směsí N_2 a CO_2 , které vstupovaly do kolony ve spodní části. Nad vstupem se nacházela deska s mnoha malými otvory, která zajišťovala jednotnou rychlost spalin, vstupujících do absorpčního procesu (viz Obrázek 16). Toky spalin a kapaliny byly měřeny průtokoměry před vstupem do kolony. Velikost a rychlost kapek byla korigována změnou tlaku v nádrži s kapalinou. Na vstupu i výstupu byla měřena koncentrace CO_2 ve spalinách pomocí infračervených analyzátorů. Padající kapičky kapaliny byly natáčeny vysokofrekvenční kamerou a z pořízených snímků se zpětně počítala velikost kapek [8].

Tabulka 5: Parametry laboratorní sprejové kolony s monodisperzní tryskou [8]

Tryska	Monodisperzní
Absorpční látka	8 % NH_3
Teplota spalin	25 °C
Tok kapaliny ($\times 10^4$)	2– 3 m^3/min
Tok spalin	0,78 – 2,16 m^3/h
Koncentrace CO_2	15 %
Tlak	Korigovaný pro upravení kapek



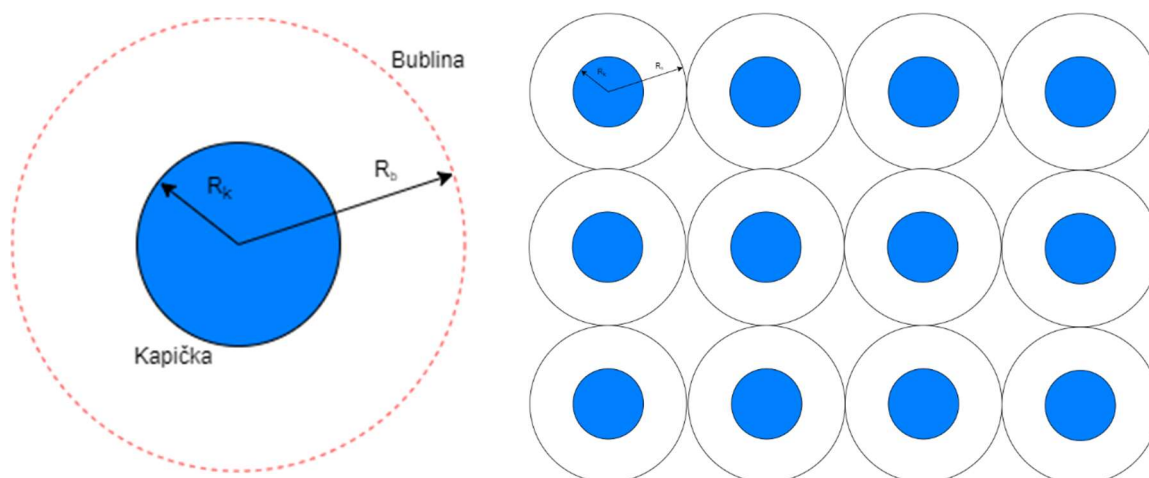
3 HLAVNÍ KOMPONENTY LABORATORNÍ SPREJOVÉ KOLONY

V této kapitole jsou rozebrány charakteristiky jednotlivých komponent, jejich dílčí provedení, výhody, nevýhody a způsob použití.

3.1 TRYSKA

V procesu zachycování CO_2 chemickou absorpcí má největší vliv na účinnost absorpce velikost distribuovaných kapek, protože přímo ovlivňuje několik důležitých parametrů, jako je rychlost kapek nebo difúzi procesu (ovlivňující čas, potřebný pro maximální nasycení kapky). Z provedených experimentů vyplývá, že pokud kapka o průměru d , která se úplně nasytí za čas t v koloně o výšce h , tak kapka o dvojnásobného průměru $2d$ se nasytí pouze z $\approx 20\%$, neboť k úplné saturaci by potřebovala až 5x vyšší kolonu. Proto je velice důležitá volba trysky. Se snižováním velikosti kapek je spojeno snížení času, potřebného k proběhnutí difúze na povrchu molekul absorbovaného plynu, a zvýšení času stráveného v koloně. S menší velikostí kapek roste pravděpodobnost, že budou kapky uneseny proudem spalin pryč z kolony. Na druhé straně, pokud by kapky měly rozměry příliš velké, docházelo by k uchycování kapek na stěně kolony a snížila by se účinnost absorpčního procesu. Z těchto důvodů je velice důležité, aby kapky měly tu nejvhodnější průměrnou velikost, která bude kompromisem obou faktorů. Typický výstupní průměr trysky používaný v předchozích studiích je $\approx 0,5$ mm. Pokud by hustota počtu kapek překročila určitou hranici, bylo by to kontraproduktivní pro celý proces, protože by se příliš snížila koncentrace spalin v koloně na úkor kapaliny. Většinou se pracuje s hustotou počtu kapek $10^3 - 10^6 \text{ cm}^{-3}$. V případě, že se používá vysoké hustoty počtu kapek, již nelze zanedbávat vzájemnou interakci mezi jednotlivými kapkami [9]. Trysky jsou v případě chemických procesů charakterizovány průměrnou velikostí kapiček, úhlem rozstříku a průměrným časem letu kapiček [11].

Kapku si lze představit složenou ze 3 částí – kapka, bublina, prázdný prostor. Bublina je pomyslná interaktivní hranice kolem kapky. Sférická oblast mezi kapkou a bublinou je oblast, kterou ovlivňuje kapka svojí přítomností. Právě v této oblasti se zachycuje největší podíl CO_2 [11]. Jelikož rozstřík kapaliny zahrnuje širokou škálu různě velkých kapiček, udává se tzv. Sauterův střední průměr (SMD) – poměr objemu a plochy povrchu kapiček [12]. Typická velikost kapiček pro laboratorní kolonu je $\text{SMD} = 30 - 50 \mu\text{m}$, rychlost spalin bývá několik centimetrů za sekundu.

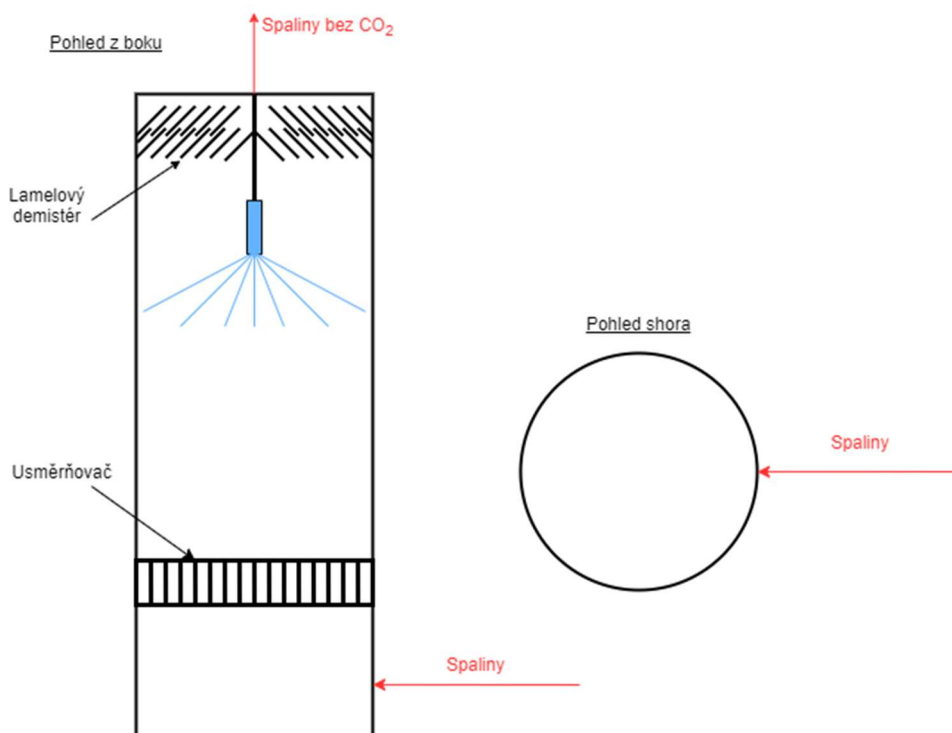


Obrázek 11: Detail okolí kapičky [9]

3.2 KOLONA

Vzhledem k tomu, že většina trysek rozstříkuje kapalinu do tvaru kužele, nejvýhodnější tvar sprejové kolony je rotační válec, ale používá se i obdélníkového průřezu (závisí na tvaru rozstříku trysky). Geometrie kolony silně ovlivňuje tok spalin a distribuci kapiček kapaliny. S výškou kolony se zvyšuje čas, který v koloně kapalina stráví. Nejdůležitějším rozměrem je ale průměr kolony. Kapičky opouští trysku velmi vysokou rychlostí. Její radiální složka se začne velice rychle snižovat, až po krátkém časovém úseku klesne téměř k nule a kapičky začnou padat svisle dolů. Pakliže by průměr kolony byl příliš velký, kapičky by neměly šanci se dostat až ke stěně a tím by u stěn proudily spaliny, které nebudou vyčištěny. Na druhé straně, kdyby průměr byl příliš malý, kapičky by dopadaly na stěnu a snížila by se účinnost absorpčního procesu. V ideálním případě by kapičky měly dorazit ke stěně s velmi nízkou radiální rychlostí [10].

Z pohledu použitého materiálu, je potřeba pro konstrukci kolony použít lehký a zejména průhledný materiál, aby bylo umožněno vizuální kontroly procesu a použití optické měřicí techniky. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2, vyhovující materiály jsou akrylové sklo, polykarbonáty, borosilikátové sklo atd. Kolonu je výhodné navrhnout z několika částí. Výhoda je především ve výrobě a montáži, ale také kvůli možnosti nastavovat délku kolony v případě potřeby. Kromě trysky, je potřeba do kolony zakomponovat demistér a rozptylovač. Demistér se nachází v horní části kolony u výstupu spalin z kolony. Smyslem demistéru je zachycovat malé kapičky, které odnesl proud spalin, aby neopouštěly kolonu. Naopak rozptylovač se nachází ve spodní části hned nad vstupem spalin do kolony a zajišťuje rovnoměrné rozptýlení proudu spalin v koloně, aby byl tok spalin stejný po celém průměru a absorpční proces dosahoval maximální účinnosti [10].



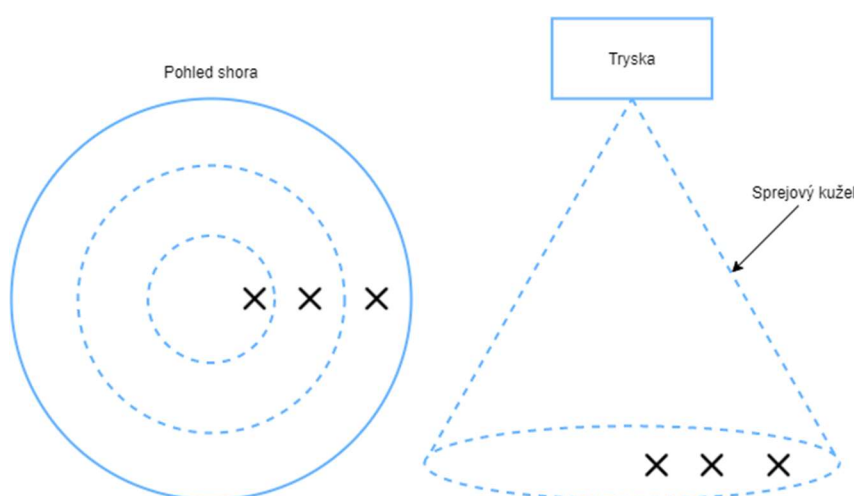
Obrázek 12: Schéma kolony a umístění demistéru a usměrňovače [10]

3.3 MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE

Pro udržování daných měřících podmínek a jejich další optimalizaci je důležité jednotlivé veličiny měřit v průběhu měření.

3.3.1 PDI SYSTÉM

Jednorozměrný PDI systém je používán k měření velikosti a rychlosti kapek na základě fázového a frekvenčního posunu lomených či odražených signálů, vysílaných laserem. Měřicí jednotka PDI systému je umístěna na pohyblivé podpoře, aby mohlo měření probíhat v různých oblastech spreje. Systém změří velikost a rychlost kapek v každé oblasti. Výsledky změřené kapky reprezentují všechny kapky v dané oblasti. Značnou nevýhodou je to, že výsledky jsou pouhou aproximací, avšak zvýšením počtu měřících míst lze zvýšit přesnost měření [4].



Obrázek 13: Body měření systémem PDI [4]

3.3.2 VZDUCHOVÉ PRŮTOKOMĚRY

Během provozu laboratorní sprejové kolony je nutné, neustále kontrolovat složení a množství vstupujícího a vystupujícího plynu, aby se mohla sledovat účinnost procesu a regulovat jeho chod. První a druhý průtokoměr je potřeba umístit ke zdroji CO_2 a N_2 (popřípadě jiné složky, záleží, co se při daném experimentu používá, např. vzduch) a regulovat pomocí nimi výslednou koncentraci směsi po smíchání. Průtokoměr je dobré umístit i ke vstupující kapalině, protože tok kapaliny je neméně důležitým parametrem.

3.3.3 LDA⁶ A FDA⁷ SYSTÉM

Tyto měřicí technologie patří mezi metody neintruzivní, protože vůbec nezasahují do procesu a měření probíhá pomocí laserových paprsků. Metoda LDA měří rychlost kapiček na základě frekvence paprsků rozptýlených kapičkami, které se porovnávají s frekvencí zdrojových paprsků. Rozdíl frekvencí je způsoben rychlostí kapiček v plynu, jinak známo jako Dopplerův jev. Metoda FDA měří průměr kapiček, která oproti LDA používá více fotodetektorů. To znamená, že jednotlivé fotodetektory změří stejné frekvence rozptýlených paprsků, ale paprsky mají odlišné frekvenční posuvy, protože jsou různě geometricky uspořádány a paprsky putují

⁶ LDA = Laserová Dopplerovská anemometrie

⁷ FDA = Fázová Dopplerovská anemometrie

různé vzdálenosti. Obě metody jsou bodové. Pro plošné měření rychlostí a velikostí kapiček je potřeba použít metodu PIV⁸ [13].

3.4 DEMISTÉR

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.2, demistér se nachází u výstupu spalin z kolony a slouží k zachycování drobných kapiček, které jsou unášeny proudem spalin. Tyto malé kapičky jsou nežádoucí minimálně ze dvou důvodů – dochází ke ztrátám absorpční kapaliny (opouští absorpčně-regenerační cyklus) a k ohrožení okolního prostředí kolony. MEA prudce zvyšuje korozi a tím by se snížila životnost součástí mimo kolonu.

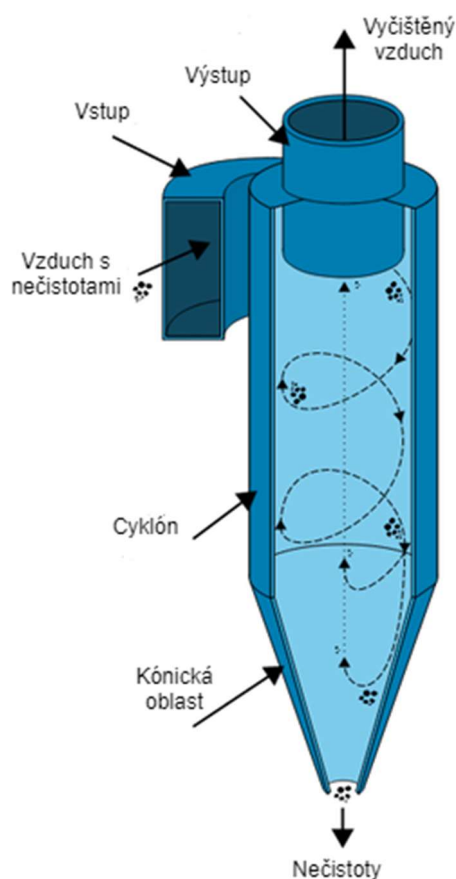
Nejjednodušší z hlediska konstrukce a zároveň nejpoužívanějším je demistér lamelový. Kostra takovéto součásti se skládá z lamel, které jsou několikrát zohýbány pod úhlem 45° ke směru proudění spalin. Vícenásobné zahnutí zvyšuje efektivitu demistéru. Proudící plyn narazí na skloněnou stěnu lamely, kde se kapičky zachytí a stečou zpět do kolony díky gravitační síle. Lamelový demistér dokáže zachytit pouze kapičky větší než 10 μm . Schopnost separace kapiček ze spalin lze ovlivňovat zmenšováním, resp. zvětšováním, prostoru mezi lamelami. Hlavní výhodou je nízká cena a velikost [13]. Pro zvýšení efektivity separace lze kombinovat s látkovými filtry.



Obrázek 14: Lamelový demistér [20]

Problémy s účinností separace lamelového demistéru lze vyřešit použitím cyklonového demistéru. Tento typ dokáže zachytit kapičky o velikosti 10 μm s 80 % účinností [13]. Cyklonový demistér využívá odstředivé síly. Spaliny vstupují do demistéru s velkou rychlostí. Tělo cyklonu má tvar podle Obrázku 15. Podobně jako u lamelového demistéru, spaliny musí změnit směr, z důvodu různé setrvačnosti se kapičky zachytí na stěně nádoby a stečou dolů. Kvůli vysoké rychlosti plynu vzniká uprostřed demistéru vír již čistého plynu a ten je odsáván v jeho horní části. Hlavní nevýhodou tohoto řešení je velikost a prostor potřebný k instalaci [14].

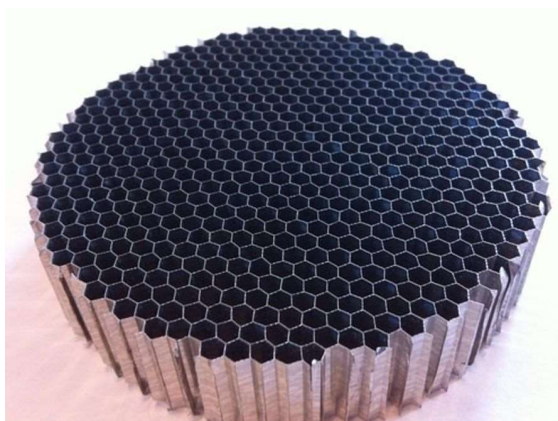
⁸ PIV = Integrovaná laserová anemometrie



Obrázek 15: Schématický obrázek cyklonového demistéru [21]

3.5 USMĚŘŇOVAČ

Princip funkce usměřovače spočívá v eliminování radiální složky rychlosti tekutiny a přetrvává pouze složka axiální. Jedná se o soustavu trubiček nejčastěji šestihránného profilu (u kruhového profilu vzniká prostor mezi profily a usměřovač není tak účinný). V koloně je umístěn ve spodní části v dostatečné vzdálenosti od trysky. Délka usměřovače by měla být minimálně desetinásobkem velikosti otvorů [15].



Obrázek 16: Fotografie usměřovače s šestihránnými otvory [22]

3.6 ROZPTYLOVAČ

Po vytvoření a přivedení směsi spalin do kolony, je potřeba zajistit rovnoměrné rozptýlení spalin po koloně, aby po celém průměru byla stejná koncentrace CO_2 . V laboratorním prostředí lze tohoto docílit umístěním mřížky ke vstupu, která má pravidelná, čtvercová oka. Za jednotlivými pruty vznikají úplavy, které spolu navzájem interagují a velice rychle vzniká proudění homogenní struktury, které napomáhají promíchání plynů. Výsledné proudění je označováno jako mřížková turbulence [16].



Obrázek 17: Příklad mřížky ukotvená v rámu [28]

3.7 POHON

V této kapitole jsou diskutovány různá řešení pro pohon simulovaných spalin v laboratorní koloně. Ventilátory jsou zasazovány do kolony v místech, kde dochází ke smíchání plynů, které simulují reálné spaliny.

3.7.1 AXIÁLNÍ VENTILÁTOR

Ventilátory jsou rotační lopatkové stroje, které zajišťují kontinuální proudění média. Rozdělují se zejména podle konstrukce lopatek a směru vstupujícího a vystupujícího média. U axiálních ventilátorů médium (např. vzduch) vstupuje i vystupuje v jeho axiálním směru. Oproti radiálním ventilátorům jsou schopny dodávat větší objemové průtoky a jsou konstrukčně jednodušší. Z toho vyplývá i využití těchto ventilátorů v praxi hlavně v oblasti vzduchotechniky při větrání, či odvodu spalin [18]. V kombinaci s axiálním ventilátorem se velmi často používá difuzor, který se umísťuje buď za či před ventilátor. Podle tlaku, se kterým ventilátory pracují, se dále rozdělují na:

- *Ventilátor přetlakový* – zde se kvůli přeměně kinetické energie na energii tlakovou vyskytuje za ventilátorem vyšší statický tlak než před ním [18]. Mají nastavitelnou širokou škálu objemových průtoků.

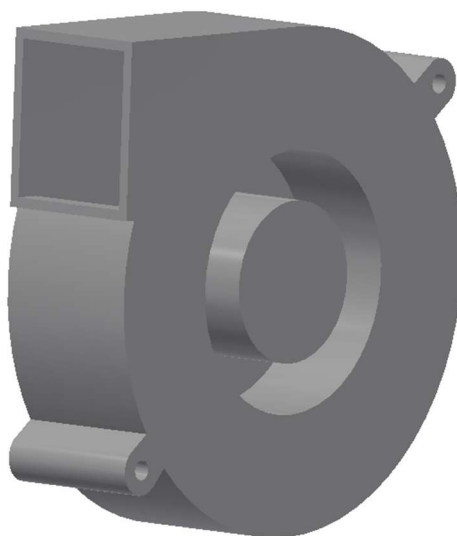
- *Ventilátory rovnotlaké* – statický tlak na vstupu je stejný jako na výstupu z ventilátoru a tlak roste v difuzoru, který je umístěn za ním. Lze použít pro velmi vysoké objemové průtoky.



Obrázek 18: Axiální ventilátor [23]

3.7.2 RADIÁLNÍ VENTILÁTOR

U tohoto řešení vstupuje médium do ventilátoru axiálně, ale vystupuje z něj v radiálním směru. Skříň ventilátoru má spirálovitý tvar a nahrazuje difuzor. Tvar radiálního ventilátoru zajišťuje maximální přeměnu dynamického tlaku proudícího média na tlak statický. Radiální ventilátory se rozdělují podle tvaru lopatek – dopředu/dozadu zahnuté a radiálně zakončené. Ventilátory s dopředu zahnutými lopatkami jsou nejlevnějším typem a dosahují nejmenší účinnosti, zaznamenávají vysoké tlakové ztráty, a proto se musí točit s vysokou úhlovou rychlostí. Naproti tomu ventilátory s dozadu zahnutými lopatkami mají vyšší přetlak a účinnost, ale společně s ní roste i jejich cena [18]. Ventilátory s radiálně zakončenými lopatkami jsou považovány za kompromis mezi výše zmíněnými typy. V této práci nebudou jednotlivé typy probrány podrobněji [18].



Obrázek 19: Radiální ventilátor [24]

3.7.3 SEPARÁTOR

V rámci ideového návrhu laboratorní sprejové kolony je nutné vzít v úvahu všechny možné řešení a použít takové prvky, aby vyhovovaly podmínkám funkčním, ekonomickým a prostorovým. Velice elegantním řešením pohonu celé kolony je použití cyklonu (viz kapitola 3.4), jehož součástí je ventilátor, který zajišťuje proudění plynů. Takovýto cyklon dokáže vyřešit otázku pohonu a separaci kapiček v rámci jedné součásti, navíc je schopen ušetřit značný prostor v laboratoři. Jeho hlavní nevýhodou je vysoká cena.



Obrázek 20: Schématický obrázek separátoru [29]

3.8 OHŘÍVAČ

Spaliny jsou simulovány smícháním CO_2 se vzduchem, který má pokojovou teplotu ($\approx 20\text{ }^\circ\text{C}$). V průmyslové aplikaci mají spaliny po spalování mnohem vyšší teplotu, a proto je potřeba plyn před absorpcí v laboratoři ohřát. Lze toho dosáhnout použitím konstrukčně jednoduchého, kruhového potrubního ohřivače (viz obrázek 25). Je to vzduchotechnické zařízení, jehož plášť je z plechu a má tvar kruhového potrubí. Uvnitř je umístěna topná spirála, která zejména konvekcí ohřívá proudící vzduch. Obecně mají ohřivače širokou škálu průtoků, pro které se dají efektivně použít. Při výběru ohřivače je potřeba vzít do úvahy průtok a teplotu média, které chceme dosáhnout. Ohřivače mají zavedenou teplotní pojistku proti přehřátí.

3.9 ZDROJE CO_2

V laboratoři nelze spalovat fosilní paliva a vytvářet tím tak spaliny používané pro experiment. Spaliny je tedy nutné nahradit směsí plynů, která nám reálné spaliny nahradí v dostatečné míře a naměřené výsledky budou validní. Jelikož se tato práce zabývá absorpcí CO_2 , není potřeba do směsi přidávat všechny složky⁹, které normálně při spalování fosilních paliv vznikají. Výsledná směs tedy vznikne smícháním vzduchu a CO_2 , které lze dodávat různými způsoby.

⁹ SO_2 , NO_2 , NO , CO atd.

Cenově i montážně jednoduché řešení je použití plynového kahanu, kde lze oxidu uhličitého dosáhnout spalováním propan-butanu. Kahan se umístí před ventilátor, který musí mít dostatečný výkon (tah), aby veškeré produkty spalování nasál do kolony. Zároveň se spaliny kahanu mísí se vzduchem. Před vstup do kolony se umístí přístroj pro měření obsahu CO_2 ve směsi a jeho koncentrace se optimalizuje přiškrcením, respektive povolením ventilu kahanu. Toto řešení však vyžaduje práci s otevřeným ohněm v laboratoři a regulaci nelze provádět dostatečně přesně.

Z hlediska bezpečnosti, praktičnosti a přesnosti měření, se zdá být nejlepším řešením použití plynových nádob. Vzduch je nasáván ventilátorem z okolního prostředí o okolní teplotě a za ventilátorem je přiváděn z plynové nádoby CO_2 . Před vstupem do kolony je měřen obsah CO_2 ve směsi. Koncentrace CO_2 je upravována ventilem na plynové nádobě, který zajišťuje přesnější nastavení množství CO_2 proudícího do kolony.

4 IDEOVÝ NÁVRH SPREJOVÉ KOLONY

Následující kapitola se zabývá návrhem takové laboratorní sprejové kolony, ve které jsou aplikovány nejlepší konstrukční řešení, diskutované v předchozích kapitolách, s ohledem na efektivnost a na konstrukční a finanční náročnost. Veškerý návrh vychází z průniku teoretických poznatků a uskutečněných experimentů. Pro otestování ideového návrhu je zapotřebí provést řadu dalších studií a otestování jej v praxi.

4.1 TĚLO KOLONY

Pro kolonu byl zvolen průhledný materiál akrylátové sklo, které umožňuje vizuální kontrolu a použití optických měřících systémů. Kolona má kruhový průřez (cylindrický tvar) o průměru 0,2 m a je složena ze 7 částí o výšce 0,2 m (1,4 m celkově), přičemž spodní a vrchní částí jsou konfuzory (vrchní pro odvod plynu, spodní jako kolektor nasycené kapaliny). Hlavním důvodem rozdělení kolony na části je možnost zkrátit či prodloužit kolonu v případě potřeby, mimo jiné to značně usnadňuje výrobu i montáž. Jednotlivé části jsou na obou koncích zakončeny přírubami, které jsou utěsněny pryžovým kroužkem a dotaženy proti sobě osmi šrouby. Ve vzdálenosti 0,3 m od spodního okraje je orientován přívod spalin o vnitřním průměru 100 mm. Ve vstupním potrubí je umístěn rozptylovač (popsán v kapitole 3.6) z důvodu promíchání směsi. Pro pohodlnější a snazší výměnu trysek byla do úrovně trysky situována dvířka. Kapalina nasycená CO_2 ztéká do nádržky ve spodní části kolony. Celá kolona je ukotvena v opěrné soustavě z 50×50 mm hliníkových tyčí se čtvercovým průřezem. Součástí kolony jsou další komponenty, které jsou diskutovány v následujících podkapitolách.



Obrázek 21: Průhledný segment těla kolony

4.1.1 USMĚRŇOVAČ

Z důvodu zrovnoměnění a usměrnění vstupujícího proudění spalin byl použit usměrňovač s otvory ve tvaru šestiúhelníku o šířce 5 mm a celkové délce 120 mm. Do kolony je upevněn pěti drážkami, rozloženými rovnoměrně po obvodu, se zpětnou hranou, aby byl zamezen posuv v obou směrech. Pro usnadnění je model na obrázku vymodelován s většími otvory (jedná se pouze o demonstraci komponenty).



Obrázek 22: Usměrňovač

4.2 CYKLONOVÝ DEMISTÉR

Ačkoli by lamelový demistér ušetřil spoustu místa v laboratoři, pro tento ideový návrh byl zvolen demistér cyklonový, kvůli jeho značně vyšší efektivitě. Hlavní část cyklonu má průměr 0,1 m a na výšku měří 0,75 m. Vstupní potrubí má průměr 0,1 m. Laboratorní kolona nedisponuje regenerační sekcí, to znamená, že absorpční kapalina necirkuluje soustavou. Absorpční proces probíhá do té doby, dokud se nevyprázdní zásobník s kapalinou. Součástí demistéru je zásobník zachycených kapek ve spodní části.



Obrázek 23: Cyklonový demistér

4.3 TRYSKA

Tryska byla umístěna ve vzdálenosti 1,2 m od vstupního přívodu spalin v geometrickém středu kolony. V koloně budou testovány různé druhy trysek, z tohoto důvodu je pevná konstrukce upevněna třemi šrouby po obvodu kolony. Spodní část konstrukce umožňuje jednoduché vyměňování trysek. Absorpční kapalina MEA je čerpána z nádrže pomocí objemového čerpadla.



Obrázek 24: Uložení trysky

4.4 OHŘÍVAČ

Proud spalin je simulován směsí CO₂ a vzduchu, který má pokojovou teplotu. Pro potřeby experimentů je nutné směs zahřát na teplotu 40 – 60 °C. V návrhu byl pro ohřev vzduchu zvolen potrubní ohříváč. Používaná pokojová teplota je 20 °C.

4.4.1 VÝPOČTY DOPROVÁZEJÍCÍ NÁVRH:

VSTUPY¹⁰

$$\Delta T = 40 \text{ } ^\circ\text{C}; c_{air} = 1005 \frac{J}{kg \cdot K}; c_{CO_2} = 843,9 \frac{J}{kg \cdot K} \quad r_{CO_2} = 188,9 \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$p_{atm} = 101325 \text{ Pa}; M_{CO_2} = 0,04401 \frac{kg}{mol}; M_{air} = 0,02896 \frac{kg}{mol}; x_{CO_2} = 0,1; x_{air} = 0,9$$

$$T = 293,15 \text{ K}; r_{air} = 287 \frac{J}{kg \cdot K}$$

VÝPOČTY¹¹

Pokud chceme navrhnout dostatečně výkonný ohříváč, musíme nejprve podle vztahu (5) vypočítat hmotnostní zlomky CO₂ a vzduchu ve výsledné směsi, vstupující do kolony. Následně podle vztahu (6) lze vypočítat měrnou plynovou konstantu směsi, která vystupuje ve výpočtu hustoty směsi v rovnici (7). Z rovnice (8) lze spočítat celkový hmotnostní tok. Dále je nutné vypočítat měrnou tepelnou kapacitu výsledné směsi podle rovnice (9). Ze vztahů (10) a (11) spočteme potřebné teplo, které je potřeba dodat, abychom proud spalin ohřáli na teplotu 40 °C, respektive 60 °C.

$$w_i = \frac{x_i M_i}{\sum_i x_i M_i} \quad (5)$$

$$r = \sum_i w_i r_i \quad (6)$$

$$\rho = \frac{p_{atm}}{rT} \quad (7)$$

$$\dot{m}_i = \dot{Q}_i \rho \quad (8)$$

$$c_{směs} = \sum_i w_i c_i \quad (9)$$

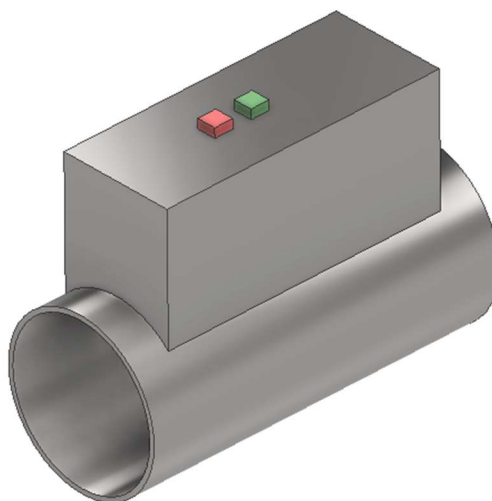
$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_1 c_{směs} \Delta T = 7814,62 \text{ W} \quad (10)$$

$$\dot{Q}_2 = \dot{m}_2 c_{směs} \Delta T = 12503,39 \text{ W} \quad (11)$$

¹⁰ T – teplota; c – měrná tepelná kapacita vzduchu; r – měrná plynová konstanta; p – tlak; M – molární hmotnost; x – objemový zlomek; ΔT – teplota ohřevu

¹¹ w_i – hmotnostní zlomek [1], ρ – hustota směsi [kg/m³], \dot{m}_i – hmotnostní tok [kg/s], \dot{Q}_i – tepelný tok

Veličiny s indexem 1 se týkají takového provozního stavu, kdy soustava pracuje nastavená na minimální parametry, tj. rychlost spalin 5 m/s o teplotě 40 °C. Veličiny s indexem 2 se týkají parametrů 8 m/s o teplotě 60 °C. Zvolené ohřívače jsou dimenzovány tak, aby bylo možné nasimulovat všechny možné stavy na dané škále teplot a rychlostí. K dosažení spočteného maximální tepelného toku Q_2 , bylo navrženo použít dva potrubní ohřívače o výkonech 6 a 9 kW. Samotný ohřev je uskutečněn přes topnou spirálu umístěnou v potrubí. Demonstrativní příklad produktu lze představit v odkazu [31] a [32].



Obrázek 25: Model potrubního ohřívače

4.5 RADIÁLNÍ VENTILÁTOR

Pohon spalin laboratorní kolonou byl zajištěn radiálním ventilátorem. Výběr ventilátoru závisel na předpokládaných podmínkách provozu kolony. Uvažovaná rychlost spalin v koloně byla 5 – 8 m/s a veličiny spjaté s těmito mezními rychlostmi jsou dále označovány indexem 1. respektive 2. Vzduch je z okolí nasáván konfuzorem, který sníží tlak proudícího vzduchu a tím lehce usnadní sání.

4.5.1 VÝPOČTY DOPROVÁZEJÍCÍ NÁVRH

VSTUPY¹²

$$v_1 = 5 \frac{m}{s}; v_2 = 8 \frac{m}{s}; D_k = 0,2 m$$

VÝPOČTY

$$Q_{k1} = v_1 \frac{\pi D_k^2}{4} = 0,1570796 \frac{m^3}{s} = 565,2 \frac{m^3}{h} \quad (12)$$

$$Q_{k2} = v_2 \frac{\pi D_k^2}{4} = 0,2513274 \frac{m^3}{s} = 903,6 \frac{m^3}{h} \quad (13)$$

4.6 TLAKOVÉ ZTRÁTY APARATURY

Úzce spjaté s návrhem ventilátoru jsou tlakové ztráty, které jsou způsobeny různorodostí vedení a použitím potrubních prvků. Ztráty dělíme do dvou skupin – délkové a místní. Délkové ztráty na tlaku jsou způsobeny viskozitou proudícího média, kdy stěny potrubí působí smykovým napětím na mezní vrstvu¹³, přičemž tyto ztráty jsou závislé na druhu proudění (charakterizováno veličinou λ), Reynoldsově čísla (z čehož vyplývá závislost na viskozitě, rychlosti média a průměru potrubí), drsnosti povrchu a délce potrubí L . Místní ztráty vznikají na hydraulických prvcích jako jsou uzávěry, konfuzory, difuzory, kolena, vstupy a výstupy atd. Jsou charakterizovány ztrátovým součinitelem ζ_m a závisí (stejně jako délkové ztráty) na kvadrátu rychlosti.

Pokud chceme spočítat celkové tlakové ztráty, je potřeba nejdřív vypočítat podle vztahů (14), (15) a (16) v jednotlivých úsecích rychlosti proudění v , Reynoldsova čísla Re a relativní drsnosti k . Na základě těchto parametrů lze z Moodyho diagramu¹⁴ vyčíst, o jaký typ proudění se v úsecích jedná, což definuje, jaký vztah použít pro výpočet λ . V tomto návrhu se jedná o hydraulicky drsné potrubí¹⁵ a pro výpočet λ byl použit Nikuradseho vztah (17). Superpozicí následně spočteme celkovou ztrátovou energii soustavy Y_Z ¹⁶ (18).

V rovnicích (14) – (19) vystupují následující veličiny: hydraulický průměr D_h [m], omočený obvod σ [m], kinematická viskozita ν (pro 50 °C $\nu = 0,0000179 \frac{m^2}{s}$), průřez potrubí S [m²] a absolutní drsnost potrubí k_a [m].

¹² v rychlost média; D_k průměr kolony

¹³ Mezní vrstva = vzdálenost stěny potrubí od míst, kde se tekutina pohybuje 99% střední rychlosti

¹⁴ Moodyho diagram lze najít v [25]

¹⁵ Pro hydraulicky drsné potrubí platí $\lambda = f(k)$

¹⁶ $Y_Z = [J/kg]$

$$Q = vS; S = \frac{\pi D_h^2}{4} \quad (14)$$

$$Re = \frac{vD_h}{\nu}; D_h = \frac{4S}{\sigma} \quad (15)$$

$$k = \frac{k_a}{D_h} \quad (16)$$

$$\lambda = \left(\frac{1}{-2 \log \left(\frac{k}{3,71D_h} \right)} \right)^2 \quad (17)$$

$$Y_Z = \sum Y_L + \sum Y_m = \sum_{i=1}^n \lambda_n \frac{L_n}{D_{hn}} \frac{v_n^2}{2} + \sum_{i=1}^n \xi_m \frac{v_n^2}{2} \quad (18)$$

$$\Delta p = Y_Z \rho \quad (19)$$

Podle vztahu (19) byly pro nejvyšší operační průtok 903,6 m³/h spočteny celkové tlakové ztráty $\Delta p = 800Pa$. Jednotlivé parametry vstupující do výpočtu jsou uvedeny v Tabulce 6 a 7.

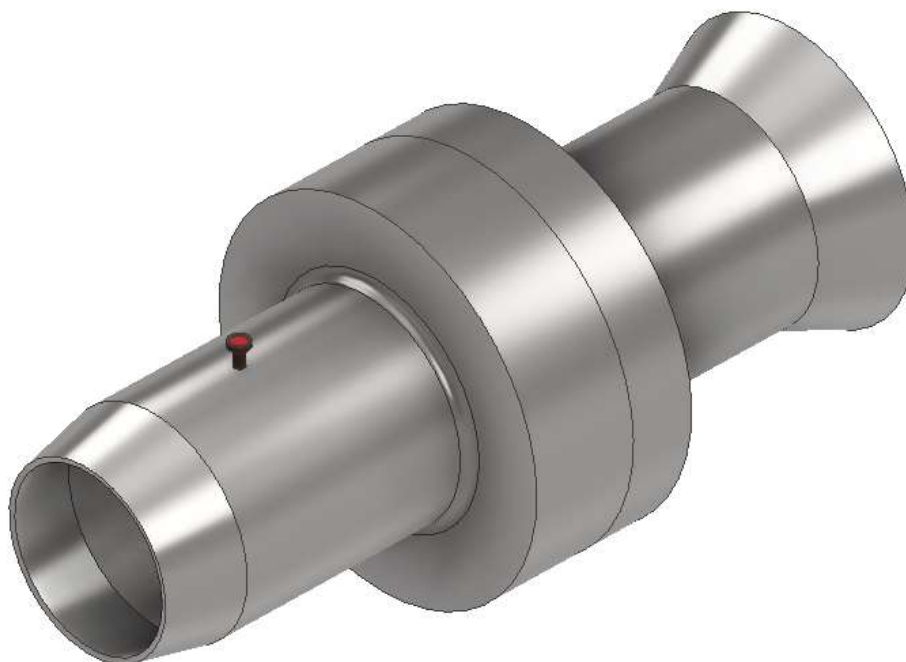
Tabulka 6: Parametry kolony a charakteristiky proudění

Prvek	L [mm]	D [mm]	v [m/s]	Re [1]	λ [1]	k [1]
Přívod vzduchu	220	200	8	89269	0,0120	0,0001000
Ohřivače	760	160	11	105022	0,0124	0,0001176
Vstup do kolony	250	100	32	178538	0,0097	0,0000300
Kolona	1500	200	8	89269	0,0086	0,0000150
Vstup do demistéru	650	100	32	178538	0,0096	0,0000300

Pozn.: Pro výpočet délkových ztrát u ohřivačů bylo uvažováno použití pouze 6 kW. Zvolený ventilátor tedy bude mít dostatečnou rezervu pro případ, že by se k experimentu použilo menších prvků.

Tabulka 7: Ztrátové součinitele jednotlivých prvků kolony [13], [25]

Prvek	ξ_m [1]
Konfuzor D_1/D_2	0,045
Konfuzor D_2/D_3	0,060
Mřížka	2,000
Vstup do kolony	1,000
Usměrňovač	1,100
Konfuzor D_4/D_5	0,065
Koleno	0,750


 Obrázek 26: Model radiálního ventilátoru se vstupem CO_2 (červený ventil)

Na základě výpočtů je potřeba použít takového ventilátoru, aby byl schopen překonat tlakové ztráty 800 Pa a byl schopen dodávat objemový tok vzduchu $903,6 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$. Demonstrativní příklad takového ventilátoru se nachází na odkazu [32].

4.7 ZDROJ CO₂ A JEHO KONCENTRACE

Směs plynů, simulující spaliny, vzniká smícháním vzduchu a CO₂, který je dodáván z tlakové lahve. CO₂ vstupuje do potrubí před ohřevem směsi a jeho koncentrace je kontrolována ventilem a měřicími jednotkami umístěnými v blízkosti vstupu do kolony. Koncentrace CO₂ je také kontrolována na výstupu z demistéru.



Obrázek 27: Měřicí systém koncentrace CO₂ [26]

4.8 MĚŘENÍ PRŮTOKU

K měření průtoku kolonou bylo zvoleno použití pitotovy trubice, umístěné za ohříváče, která je zároveň opatřena teplotním čidlem pro měření teploty proudících spalin.



Obrázek 28: Pitotova trubice

4.9 OPTICKÉ MĚŘÍCÍ SYSTÉMY

Pro analýzu a vyhodnocení jednotlivých trysek, testovaných v laboratorní sprejové koloně, je zapotřebí získávat data přímo z oblasti absorpce. Z tohoto důvodu je kolona zkonstruována z průhledného materiálu a bylo tak umožněno použití optických přístrojů. Pro měření parametrů, které dokáže tryska dodávat (průměr a rychlost kapiček), byly zvoleny systémy LDA, resp. FDA. Jsou situovány v místech umístěny na pohyblivých kolejkách, aby se podle druhu trysky daly posunout do různých poloh sprejového kužele. Ke zkoumání chování trysek je vhodné použít navíc i vysokorychlostní kameru.

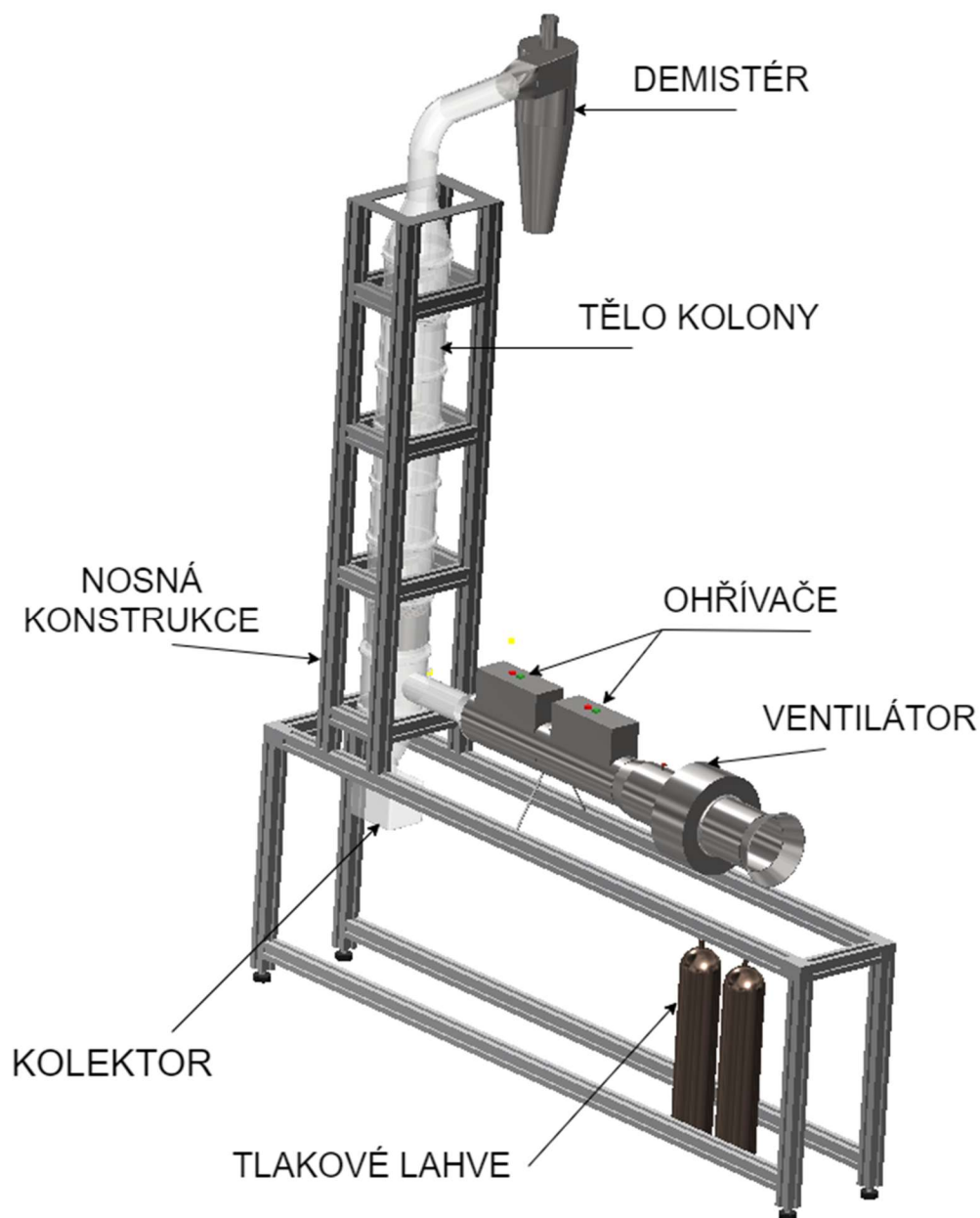
4.10 EKONOMICKÁ BILANCE KOLONY

Tabulka 8: Ekonomická bilance kolony [Kč]

Radiální ventilátor	18 000,-
2x Ohřívač	11 500,-
Tlaková lahev CO ₂ (10 kg)	1 000,-
Měřáky koncentrace	30 000,-
Čerpadlo (s ovládním)	12 000,-
Konstrukce	15 000,-
Usměrňovač	1 000,-
Absorpční kapalina MEA	1 000,- / litr
Celková návrhová cena	93 500,-

Pozn.: Prvky neuvedené v tabulce je možné vyrobit levněji v laboratoři, nebo se v laboratoři již vyskytují a jsou k dispozici. Celková návrhová cena je pouze orientační. Při samotném sestavování laboratorního aparátu lze očekávat spíše vyšší náklady.

4.11 SESTAVENÍ LABORATORNÍ APARATURY



Obrázek 29: Model sestavení aparatury

Model sestavení laboratorní aparatury sprejové kolony byl vymodelován velmi zjednodušeně, bez spojovacího materiálu, kabeláže apod. Přívod absorpční kapaliny a čerpadlo, odvod vyčištěných spalin a finální zpracování nasycené kapaliny taktéž nejsou součástí modelu. Těmito náležitostmi je potřeba se zabývat při dalším návrhu sprejové kolony.

ZÁVĚR

V bakalářské práci je analyzován problém zachycování CO₂ po spalování a v průmyslové výrobě. Především se práce věnuje sumarizaci všech dostupných znalostí z oblasti laboratorních sprejových kolon. V úvodu práce je krátce rozveden absorpční proces, využívaný k separaci CO₂. Následuje zhodnocení a porovnání kladů a záporů jednotlivých metod zachycování CO₂. Vliv spreje a okrajových podmínek na účinnost absorpce není explicitně zjištěn a dostatečně prozkoumán, protože v této oblasti neproběhlo zatím dostatek výzkumů. Z tohoto důvodu jsou v další části práce popsány jednotlivé laboratorní sprejové kolony, které vznikly na akademické půdě po celém světě a přistupují ke konstrukci odlišnými způsoby. Dosažené poznatky z těchto studií jsou využity pro ideový návrh sprejové kolony, který klade důraz na možnost provedení experimentů s optickými přístroji, ekonomickou stránku, montáž a efektivitu procesu. Volbě jednotlivých komponent a konstrukčních řešení v ideovém návrhu předchází řešerše (kapitola 3) stavby kolony, okrajových podmínek experimentu, trysek, hydraulických prvků a měřících systémů, které lze v návrhu využít. Při návrhu konstrukce laboratorní sprejové kolony bylo využito empirických poznatků, které jsou známy z předchozích studií. Pro správné dimenzování kolony byly spočítány celkové tlakové ztráty kolony a objemový průtok kolonou, odpovídající rychlosti proudění 5 – 8 m/s. Na základě těchto výpočtů byl zvolen ventilátor, který těmto podmínkám vyhovuje. Spaliny je nutné před vstupem do kolony ohřát na teplotu 40 – 60 °C. Ohřev je zajištěn dvěma potrubními ohříváči, které ohřívají procházející vzduch topnou spirálou. Součástí kolony je usměřovač, mřížka a tryska, situovaná v geometrickém středu kolony. Proud plynu opouštějící kolonu je očištěván v cyklonovém demistéru, kde jsou separovány malinké kapičky absorpční kapaliny, které unesl proud spalin. Spaliny jsou simulovány směsí vzduchu a CO₂, dodávaného z tlakové lahve. Koncentrace CO₂ je kontrolována na vstupu a výstupu z kolony. Parametry trysky, resp. kapiček, jsou měřeny LDA/FDA systémem, který měří rychlost a velikost kapiček absorpční kapaliny. MEA je čerpána čerpadlem ze zásobníku do trysky a po nasycení je sbírána do kolektoru ve spodní části kolony. Součástí kolony není regenerační část, proces zachycování probíhá do vyprázdnění zásobníku MEA. Následně je třeba regenerovat nasycenou MEA manuálně. Laboratorní sprejová kolona stojí na opěrném systému hliníkových čtvercových profilů.

V návaznosti na tuto práci je potřeba kolonu zdokonalit, nasimulovat a následně zkonstruovat. Následující práce by měly směřovat k ověření ideového návrhu, testování a jednoznačnému určení vlivu jednotlivých trysek a okrajových podmínek na účinnost absorpce.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] A. RACKLEY, Stephen. *Carbon Capture and Storage*. Burlington: Elsevier, 2010. ISBN 9780080951386.
- [2] DARDE, V., *CO2 capture using aqueous ammonia*, Kongens Lyngby, Disertační práce, DTU Chemical Engineering, 2011. ISBN 978-87-92481-56-6
- [3] KUNTZ, Jeffery a Adisorn AROONWILAS. *Performance of Spray Column for CO2 Capture Application. Industrial & Engineering Chemistry Research* [online]. 2008, 47(1), 145–153 [cit. 2021-5-16]. ISSN 0888-5885. Dostupné z: doi:10.1021/ie0617021
- [4] TAMHANKAR, Y., B. KING, J. WHITELEY, T. CAI, K. MCCARLEY, M. RESETARITS a C. AICHELE. *Spray absorption of CO2 into monoethanolamine: Mass transfer coefficients, droplet size, and planar surface area. Chemical Engineering Research and Design* [online]. 2015, 104, 376–389 [cit. 2021-5-16]. ISSN 02638762. Dostupné z: doi:10.1016/j.cherd.2015.08.012
- [5] WU, Xiaomei, Yunsong YU, Zhen QIN a Zaoxiao ZHANG. *Performance of CO2 absorption in a diameter-varying spray tower. Chinese Journal of Chemical Engineering* [online]. 2017, 25(8), 1109–1114 [cit. 2021-5-16]. ISSN 10049541. Dostupné z: doi:10.1016/j.cjche.2017.03.013
- [6] TAMHANKAR, Yash, Brett KING, Rob WHITELEY, Michael RESETARITS, Tony CAI a Clint AICHELE. *Aqueous Amine Spray Absorption and Droplet Distribution Data for CO2 Capture Applications. Energy Procedia* [online]. 2014, 63, 293-300 [cit. 2021-5-16]. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2014.11.032
- [7] LI, Zheng, Xiaoyan JI, Zhuhong YANG a Xiaohua LU. *Experimental studies of air-blast atomization on the CO2 capture with aqueous alkali solutions. Chinese Journal of Chemical Engineering* [online]. 2019, 27(10), 2390-2396 [cit. 2021-5-16]. ISSN 10049541. Dostupné z: doi:10.1016/j.cjche.2019.01.021
- [8] CHO, Minki, Sookab LEE, Munkyoung CHOI a Jin W. LEE. *Novel Spray Tower for CO2 Capture Using Uniform Spray of Monosized Absorbent Droplets. Industrial & Engineering Chemistry Research* [online]. 2018, 57(8), 3065-3075 [cit. 2021-5-16]. ISSN 0888-5885. Dostupné z: doi:10.1021/acs.iecr.7b05309
- [9] CHEN, Wei-Hsin, Yu-Lin HOU a Chen-I HUNG. *Influence of droplet mutual interaction on carbon dioxide capture process in sprays. Applied Energy* [online]. 2012, 92, 185-193 [cit. 2021-5-16]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2011.10.035
- [10] LIM, Youngbok, Munkyoung CHOI, Kunwoo HAN, Minyoung YI a Jinwon LEE. *Performance Characteristics of CO2 Capture Using Aqueous Ammonia in a Single-Nozzle Spray Tower. Industrial & Engineering Chemistry Research* [online]. 2013, 52(43), 15131-15137 [cit. 2021-5-16]. ISSN 0888-5885. Dostupné z: doi:10.1021/ie401981u

- [11] DIMICCOLI, A., M. DI SERIO a E. SANTACESARIA. *Mass Transfer and Kinetics in Spray-Tower-Loop Absorbers and Reactors. Industrial & Engineering Chemistry Research* [online]. 2000, 39(11), 4082-4093 [cit. 2021-5-16]. ISSN 0888-5885. Dostupné z: doi:10.1021/ie000137y
- [12] LEFEBVRE, Arthur H. *Atomization and sprays*. New York: Hemisphere Pub., c1989. Combustion (New York, N.Y.: 1989): 1989). ISBN 0891166033.
- [13] CEJPEK, Ondřej. *Návrh a realizace aerodynamického tunelu pro rozstříkovací trysky* [online]. Brno, 2020 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zavprace/detail/124871>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jan Jedelský.
- [14] PARK, Donggeun a Jeung Sang GO. *Design of Cyclone Separator Critical Diameter Model Based on Machine Learning and CFD*. Processes [online]. 2020, 8(11) [cit. 2021-5-16]. ISSN 2227-9717. Dostupné z: doi:10.3390/pr8111521
- [15] Fu, Che & Peng, Q. & Li, Y. & Liao, D. & Lyu, J. & Zhu, B.. (2016). *Experimental study of flow straightening and turbulence reduction characteristics for porosity honeycomb*. 30. 17-22. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: doi:10.11729/sytlx20150111.
- [16] URUBA, Václav. *Turbulence*. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. [cit. 2021-5-16]. ISBN 978-80-01-04330-1.
- [17] VYMĚTALÍK, Z. *Stanovení charakteristik ventilátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 49 s. [cit. 2021-5-16]. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Kracík
- [18] COUFALÍK, M. *Měření charakteristik ventilátorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 65 s. [cit. 2021-5-16]. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
- [19] ŠOB, František. *Hydromechanika*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. [cit. 2021-5-16]. ISBN 978-80-214-3578-0.
- [20] Walcoom Corporation – Leading Wire Mesh Solutions Provider [online]. Copyright © [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.walcoom.com/pdf/mist-eliminator-catalog.pdf>
- [21] *Cyclone Separator* [online]. Copyright © 2016 cPanel, Inc. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Cyclone_separator#cite_note-1
- [22] Honeycomb – Air Straightener installed on Russell Turnbull's Toyota MR2 on Wheelwell. Buy Auto Parts & Custom Car Community | Wheelwell [online]. Copyright © 2021 Wheelwell Inc. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://wheelwell.com/russell-turnbull/18x7/1994-toyota-mr2/4k76/honeycomb-air-straightener>
- [23] Free CAD Designs, Files & 3D Models | The GrabCAD Community Library. GrabCAD: Design Community, CAD Library, 3D Printing Software [online]. Copyright © 2021 GrabCAD, a STRATASYS solution [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/axial-ventilator-fan-50-mm-1>

- [24] Free CAD Designs, Files & 3D Models | The GrabCAD Community Library. GrabCAD: Design Community, CAD Library, 3D Printing Software [online]. Copyright © 2021 GrabCAD, a STRATASYS solution [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/radial-ventilator-fan-50mm-1>
- [25] *Hydraulic losses – Chapter 4* [online]. Copyright © [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://faculty.tru.ca/eahmed/Chapters/ARET%203400%20-%20Chapter%204.pdf>
- [26] Kane 456 Flue Gas Analyser | test-meter.co.uk. Test Meters, Electrical Testing Equipment & Measurement Instruments | test-meter.co.uk [online]. Copyright © Fisheye Media Ltd. All rights reserved. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.test-meter.co.uk/kane-456-flue-gas-analyser>
- [27] METZ, Bert, Ogunlade DAVIDSON, Heleen DE CONICK, Manuela LOOS a Leo MEYER. *Carbon Dioxide Capture and Storage*. 1st. Kanada: Cambridge University Press, New York, 2005. [cit. 2021-5-16]. ISBN 13 978-0-521-86643-9.
- [28] UŘIČÁŘ, F. *Experimentální studium turbulence za drátěnou mřížkou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 50 s. [cit. 2021-5-16]. Vedoucí bakalářské práce Ing. František Lízal, Ph.D.
- [29] Filtermist. Home | Benson Machines & Machine Tools [online]. Copyright © Benson Machines [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.bensonmachines.com/products/filtermist/>
- [30] Kruhový ohřívač elektrický Ø 160 mm / 6,0kW | VENTILATORY.cz. VENTILATORY.cz - Svět větrání na jednom místě [online]. Copyright © 2011 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.ventilatory.cz/kruhovy-ohrivac-elektricky-o-160-mm-6-0kw-x11857>
- [31] Kruhový ohřívač elektrický Ø 250 mm / 9,0kW | VENTILATORY.cz. VENTILATORY.cz - Svět větrání na jednom místě [online]. Copyright © 2011 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.ventilatory.cz/kruhovy-ohrivac-elektricky-o-250-mm-9-0kw-x11862>
- [32] Radiální ventilátor [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.ventilatory.net/rfe-280-30-0-75-3-l-e-hl.html>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

\dot{Q}_t	[W]	Tepelný tok
\dot{m}	[kg/s]	Hmotnostní tok
c_{air}	[J/kg·K ⁻¹]	Měrná tepelná kapacita vzduchu
c_{co2}	[J/kg·K ⁻¹]	Měrná tepelná kapacita CO ₂
$c_{\text{směs}}$	[J/kg·K ⁻¹]	Měrná tepelná kapacita směsi vzduchu a CO ₂
D_h	[m]	Hydraulický průměr
D_i	[m]	Průměr potrubí
D_k	[m]	Průměr kolony
k	[1]	Relativní drsnost
k_a	[m]	Absolutní drsnost
M_{air}	[kg/mol]	Molární hmotnost vzduchu
M_{co2}	[kg/mol]	Molární hmotnost CO ₂
σ	[m]	Omočený obvod
p_{atm}	[Pa]	Atmosférický tlak
Q	[m ³ /h]	Objemový tok
Q_k	[m ³ /h]	Objemový tok kolonou
r_{air}	[J/kg·K ⁻¹]	Měrná plynová konstanta vzduchu
R_b	[μm]	Průměr bubliny
r_{co2}	[J/kg·K ⁻¹]	Měrná plynová konstanta CO ₂
Re	[1]	Reynoldsovo číslo
R_k	[μm]	Průměr kapičky
S	[m ²]	Průtočný průřez
SMD	[μm]	Sauterův střední průměr
T	[K]	Pokojová teplota vzduchu
v	[m/s]	Rychlost
w_i	[1]	Hmotnostní zlomek složek
x_{air}	[1]	Objemový zlomek vzduchu
x_{co2}	[1]	Objemový zlomek CO ₂
Y_L	[J/kg]	Měrná ztrátová energie délkových ztrát
Y_m	[J/kg]	Měrná ztrátová energie místních ztrát
YZ	[J/kg]	Celková měrná ztrátová energie
Δp	[Pa]	Tlakové ztráty

ΔT	[°C]	Teplota ohřátí
λ	[1]	Koeficient tření
ξ_m	[1]	Součinitel místních ztrát
ρ	[kg/m ³]	Hustota
ν	[m ² /s]	Kinematická viskozita