



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

SPALOVÁNÍ ODPADNÍCH PLYNŮ

WASTE GAS COMBUSTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Robin Krček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Robin Krček**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

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:

Spalování odpadních plynů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Ekonomika provozu energetických i průmyslových centrál vede k využívání hořlavých plynů, které ještě před časem byly likvidovány bez jakékoli snahy o využití jejich energetického potenciálu. Tyto odpadní plyny mají často velmi nízkou výhřevnost a obsahují inertní plyny nebo nečistoty, které omezují jejich využití. Bakalářská práce je zaměřena na přehled vlastností těchto odpadních plynů a návrh úprav, které povedou ke stabilnímu kvalitnímu spalovacímu procesu.

Cíle bakalářské práce:

- přehled odpadních plynů a jejich vlastností,
- přehled opatření pro úpravu plynů,
- přehled příkladů využití odpadních plynů.

Seznam doporučené literatury:

BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Vyd. 3. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2019. ISBN 978-80-214-5769-7.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

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

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

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou využití odpadních plynů jako paliva. První část se zaměřuje na procesy vzniku, vlastnosti a složení vybraných odpadních plynů. Následuje část obsahující přehled metod využívaných při úpravách a odstraňování znečišťujících látek z plynu. Nakonec jsou shrnuty technologie, které spalováním odpadních plynů vyrábějí elektrickou, tepelnou nebo mechanickou energii.

Klíčová slova

Odpadní plyn, čištění plynu, plynové hořáky, kogenerace, biometan

Abstract

This bachelor thesis deals with the issue of using waste gases as fuel. The first part is focused on the production processes, properties and composition of selected waste gases. The following part is an overview of the methods used in the treatment and removal of pollutants from the gas. Finally, technologies that generate electrical, thermal or mechanical energy by burning waste gases are summarized.

Key Words

Waste gas, gas treatment, gas burners, cogeneration, biomethane

Bibliografická citace

KRČEK, Robin. *Spalování odpadních plynů* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139576>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Marek Baláš.

Prohlášení autora o původnosti práce

Tímto prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Spalování odpadních plynů zpracoval samostatně za použití uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce.

V Brně dne:

.....
Robin Krček

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval své rodině, přítelkyni a přátelům, kteří mě podporovali po celou dobu mého studia. Dále bych rád poděkoval svému vedoucím doc. Ing. Marku Balášovi Ph.D. za jeho cenné rady a pomoc při vypracovávání této bakalářské práce.

Obsah

Úvod	10
1 Odpadní plyny.....	11
1.1 Vysokopecní plyn	11
1.2 Konvertorový plyn	12
1.3 Důlní plyn	13
1.4 Koksárenský plyn	13
1.5 Skládkový plyn	14
1.6 Kalový plyn.....	15
1.7 Shrnutí.....	15
2 Odstraňování tuhých znečišťujících látek.....	16
2.1 Suché mechanické odlučovače	16
2.2 Mokrý mechanické odlučovač	17
2.3 Elektrostatické odlučovače	19
2.4 Filtry.....	20
2.5 Shrnutí.....	21
3 Odstraňování sirných sloučenin	21
3.1 Adsorpce čisticí hmotou	21
3.2 Regenerativní metody	21
3.3 Shrnutí.....	22
4 Odstraňování oxidu uhličitého	22
4.1 Adsorpce střídáním tlaků	22
4.2 Regenerativní metody	22
4.3 Membránové metody	22
4.4 Shrnutí.....	23
5 Sušení	23
5.1 Adsorpční metody	23
5.2 Absorpční metody	23
5.3 Vymrazovací metody	23
5.4 Shrnutí.....	24
6 Spalování odpadních plynů.....	24
6.1 Plynové hořáky	24
6.2 Kogenerační jednotky	25
6.3 Automobily na plynná paliva.....	27
6.4 Shrnutí.....	28
Závěr	29

Úvod

Energetický průmysl prochází v současné době velkou proměnou, kdy je čím dál více upouštěno od spalování fosilních paliv a kdy se přechází k jiným alternativním zdrojům energie. To je způsobeno zejména globální klimatickou krizí a neustále se zvyšujícími požadavky na ochranu životního prostředí, ale také rychle se vyčerpávajícími zásobami nerostných surovin. Evropská unie se také po vojenském vpádu Ruska na Ukrajinu zavázala ke snížení závislosti na ruském zemním plynu a ropě, což tento proces v Evropě výrazně urychlí.

Zajímavou alternativu nejen k zemnímu plynu může představovat využívání některých odpadních plynů vznikajících například v hutnickém průmyslu, v čističkách odpadních vod nebo na skládkách komunálního odpadu. Přehled vybraných plynů, jejich vzniku, vlastností a složení je uveden v první části této bakalářské práce.

Odpadní plyny často obsahují kromě hořlavých látek také značné množství znečišťujících látek ať už v podobě tuhých prachových částic, vlhkosti, oxidu uhličitého nebo sloučenin síry. Ty mohou při spalování způsobovat celou řadu nepříznivých jevů, a proto je nejprve nezbytné tyto látky z plynu odloučit. Náročnost čištění bývá v mnoha případech hlavní překážkou k využívání odpadního plynu i přesto to však může být ekonomicky výhodné. Technologie a metody používané k čištění plynů jsou popsány v druhé části.

Upravené na požadované vlastnosti mohou být odpadní plyny spalovány v plynových hořácích pro výrobu tepelné energie nebo v kogeneračních jednotkách produkující elektřinu i teplo. Ve stlačené podobě mohou sloužit také jako palivo pro spalovací motory automobilů. Využití se věnuje poslední část této bakalářské práce.

1 Odpadní plyny

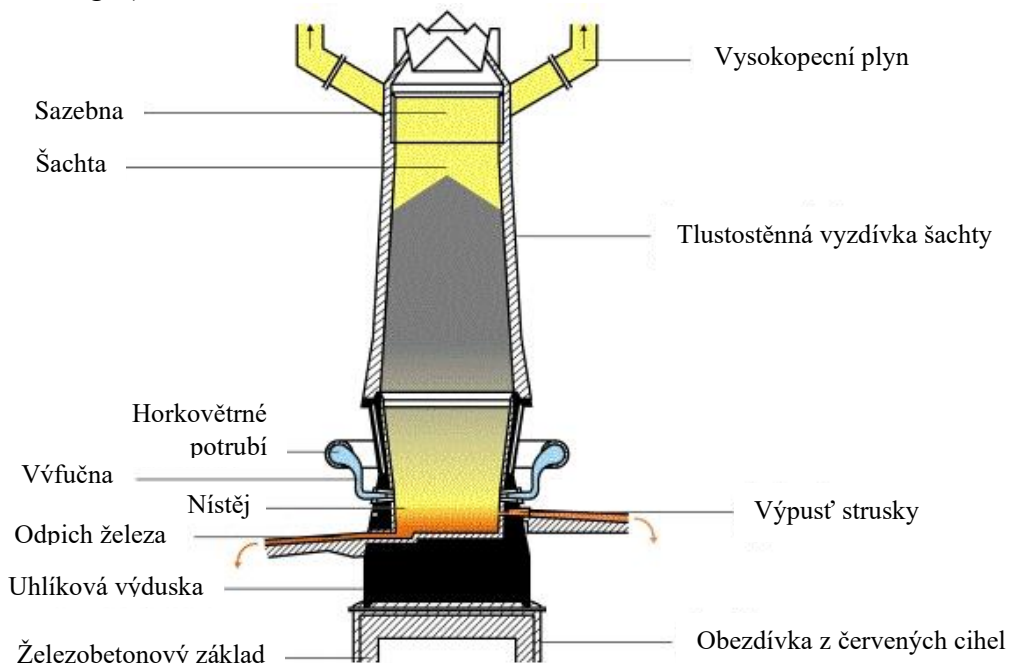
Odpadní plyny většinou vznikají jako druhotný produkt v průmyslové výrobě. V této bakalářské práci se budeme zabývat odpadními plyny, které můžeme zařadit do skupiny plynných paliv. Ty obsahují hořlavé látky jako například plynné uhlovodíky, oxid uhelnatý nebo vodík.

Podle ČSN 38 5502 můžeme plynná paliva bez ohledu na jejich původ rozdělit do čtyř základních skupin podle hodnoty spalného tepla:

- Málo výhřevné – spalné teplo do $8,37 \text{ MJ/m}^3$
 - Vysokopecní plyn
- Středně výhřevné – spalné teplo do $12,56 \text{ MJ/m}^3$
 - Konvertorový plyn
 - Důlní plyn
- Velmi výhřevné – spalné teplo do $20,93 \text{ MJ/m}^3$
 - Koksárenský plyn
 - Skládkový plyn
 - Kalový plyn
- Velmi vysoce výhřevné – spalné teplo nad $20,93 \text{ MJ/m}^3$. [1; 2]

1.1 Vysokopecní plyn

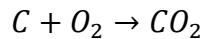
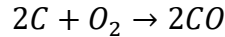
Při procesu získávání surového železa ve vysokých pecích se uvolňuje značné množství plynů. Tato směs se nazývá vysokopecní plyn, někdy též kychtový plyn nebo BFG (z anglického blast furnace gas).



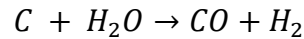
Obrázek 1 Schéma vysoké pece [3]

Vznik

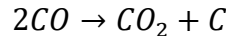
Vysoká pec je uzavřené metalurgické zařízení, do kterého je shora zavážena vsázka tvořená koksem, struskotvornými přísadami a materiálem s podílem železa jako kusová železná ruda, pelety nebo aglomerát. Do spodní části vysoké pece je výfučnami vháněn vzduch obohacený o kyslík předehřátý na 700 až $1000 \text{ }^\circ\text{C}$. Ten silně exotermicky reaguje spolu s koksem, přičemž pec vyhřívá až na $2000 \text{ }^\circ\text{C}$. Vzniká oxid uhelnatý a oxid uhličitý:



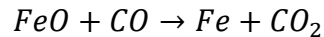
Vzduch obsahuje malé množství vlhkosti. Ta při kontaktu s koksem vytváří vodní plyn:



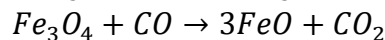
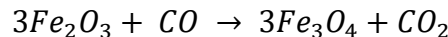
Jak plyny postupují pecí vzhůru ohřívají a vysouší vsázku. Tím se do plynů dostává vodní pára i značné množství prachových částic. Ochlazováním plynů dochází také ke změně složení, protože se část oxidu uhelnatého mění na oxid uhlíčitý a uhlík:



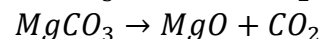
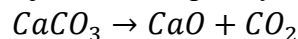
Při teplotách kolem 1800 °C dochází k přímé redukci oxidu železnatého:



Ještě výše probíhá vlivem nižších teplot také nepřímá redukce oxidu železitého a oxidu železato-železitého:



Dalším zdrojem plynů jsou reakce struskotvorných přísad jako uhličitánu vápenatého nebo uhličitánu hořečnatého, které se rozpadají na oxid vápenatý, oxid hořečnatý a oxid uhlíčitý: [4; 5]



Složení a vlastnosti

Vzniklý plyn opouštějící vysokou pec má teplotu 150 až 500 °C, je vlhký a silně znečištěný pevnými částicemi vsázky, obsahuje jich až 30 g/m³. Výsledné složení je velice závislé na množství koksu ve vsázce a dalších pracovních parametrech vysoké pece, proto se vysokopecní plyny mohou lišit provoz od provozu. Obecně obsahuje jen malé množství metanu, vodíku a téměř žádnou síru. Naopak má vysoký obsah oxidu uhelnatého, proto je prudce jedovatý, bez zápachu a prakticky bezbarvý. [4; 5]

Tabulka 1 Složení a výhřevnost vysokopecního plynu [2]

Objemové složení					Výhřevnost [MJ/m ³]
N ₂	CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	
[%]					
59,6	26	12	2	0,4	3,66

1.2 Konvertorový plyn

Surové železo roztavené ve vysoké peci obsahuje nepřipustný podíl síry, křemíku, fosforu nebo manganu. Síra je často z tekutého železa odstraněna ještě před kyslíkovou konvertorovou ocelárnou. Ostatní nežádoucí látky jsou ze surového železa odstraněny v kyslíkovém konvertoru, kde při tomto procesu vzniká konvertorový plyn, někdy také BOFG (z anglického basic oxygen furnace gas).

Vznik

Kyslíkový konvertor je nádoba hruškovitého tvaru, ve které se do taveniny železa dmýchá tryskou čistý kyslík způsobující exotermickou reakci. Ta udržuje teplotu uvnitř konvertoru na přibližně 1600 °C. Jak kyslík prostupuje taveninou dochází k oxidaci nechtěných látek. Křemík, fosfor nebo mangan tak odchází ve formě strusky. Zatímco uhlík se vylučuje v podobě plynu hlavně jako oxid uhelnatý. Celý proces trvá asi 30 až 40 minut podle parametrů provozu. Konvertorový plyn vzniká pouze v dmýchací fázi (přibližně 15 minut). [6; 7]

Složení a vlastnosti

Plyn z kyslíkového konvertoru se složením hodně podobá vysokopecnímu plynu, ale s menším obsahem dusíku. To je způsobeno rozdílnými plyny, které vstupují do procesu. Do vysoké pece je vháněn vzduch, zatímco do konvertoru kyslík. Konvertorový plyn je obsahuje hlavně oxid uhelnatý, oxid uhličitý a dusík. Složení plynu se mění v závislosti na průběhu reakce, použitém množství kyslíku a jiných parametrech konvertoru. Je bezbarvý, bez zápachu a prudce jedovatý pro jeho vysoký obsah oxidu uhličitého. Ve směsi se vzduchem tvoří výbušnou směs. [6; 7]

Tabulka 2 Složení a výhřevnost konvertorového plynu [6]

Objemové složení					Výhřevnost [MJ/m ³]
CO	CO ₂	N ₂	H ₂	O ₂	
[%]					
58 – 70	15 – 20	12 – 20	0,9 – 1	0,1 – 0,3	10

1.3 Důlní plyn

Důlní plyn se vyskytuje společně s uhelnými ložisky. Jeho přítomnost v dolech byla od počátku velkou komplikací pro dobývání uhlí. Dnes je z většiny dolů odčerpáván a vypouštěn do ovzduší nebo spalován bez užitku. Přitom 30 až 40 % všech uhelných dolů na světě produkuje vhodný důlní plyn k výrobě energie.

Vznik

Podobně jako uhlí se důlní plyn vytváří zuhelňováním původně biologického materiálu při geologických procesech. Nalezneme ho tedy navázán přímo na uhelné sloje nebo v podzemních kapsách. Těžbou uhlí se tento plyn uvolňuje a odvětráváním důlních prostorů dostává až na povrch. [6; 7]

Složení a vlastnosti

Složení ovlivňuje velká řada faktorů od geologický až po ty spojené s těžbou uhlí. Obecně je jeho hlavní složkou metan, dále pak oxid uhličitý, dusík, kyslík a další. Díky vysokému obsahu metanu je velmi nebezpečnou látkou, která tvoří se vzduchem výbušnou směs. [6; 7]

Plyn z netěžených uhelných ložisek má nejvyšší podíl metanu (až 90 %). Jeho složení se v čase téměř nemění. Oproti tomu plyn z aktivních důlních děl obsahuje méně metanu (25 až 60 %) a více vzduchu. Toto složení se však může nárazově měnit. Plyn z ukončených důlních děl se složením opět blíží plynu z netěžených ložisek. Obsah metanu se časem velmi pomalu zvyšuje z 60 až na 80 %. [6; 7]

1.4 Koksárenský plyn

Tento plyn se vytváří v koksárenských pecích jako vedlejší produkt vysokoteplotní karbonizace černého uhlí.

Vznik

Koksování začíná zavážením koksárenské pece práškovým uhlím. To je následně bez přístupu vzduchu zahříváno na teplotu 1000 až 1150 °C. Dochází ke karbonizaci, při které se z černého uhlí uvolňují těkavé látky. Tento proces může trvat 15 až 18 hodin. Avšak koksárenská baterie se skládá z dostatečného počtu koksárenských pecí pro nepřetržitou výrobu koksárenského plynu. Plyn je odváděn z koksárenských pecí a ochlazován na teplotu 80 °C. [8]

Složení a vlastnosti

Surový koksárenský plyn je bezbarvý, bez zápachu, lehčí než vzduch a díky přítomnosti oxidu uhličitého, sulfanu je toxický. Jeho vlastnosti a složení hodně ovlivňuje druh použitého uhlí, doba a způsob karbonizace atd.. [9]

Tabulka 3 Složení a vlastnosti koksárenského plynu [10]

Objemové složení					Výhřevnost [MJ/m ³]
H ₂	CH ₄	CO	N ₂	CO ₂	
[%]					
52 – 59	26 – 33	4,5 – 7	1,9 – 5,7	1,4 – 2,1	15

1.5 Skládkový plyn

Zbytky jídla, papír, textilie, kůže nebo například dřevo tvoří značnou část komunálního odpadu. Tato organická hmota se po uložení na skládky samovolně aerobně a následně také anaerobně rozkládá. Při tomto neřízeném procesu vzniklá směs plynů se nazývá skládkový plyn, někdy také LFG (z anglického landfill gas).

Vznik

Bakteriální rozklad můžeme rozdělit do čtyř různě dlouhých fází, během kterých se produkce a složení skládkového plynu mění. Skládky komunálního odpadu přijímají odpad několik desítek let, tak že dochází k několika (všem) fázím současně. Tvorba plynu ale pokračuje i dlouho po uzavření a rekultivaci skládky [11; 12; 13].

První fází je aerobní fermentace, kdy bakterie za přístupu kyslíku rozkládají dlouhé řetězce cukrů, tuků a bílkovin obsažených v organické hmotě. Hlavním vedlejším produktem je zde oxid uhličitý. Tato fáze může trvat několik dní, ale i měsíců a končí v momentě spotřebování veškerého kyslíku. [11; 12; 13]

Poté začne docházet k anaerobnímu rozkladu sloučenin vzniklých v první fázi na metanol, etanol, kyselinu octovou, mléčnou a mravenčí. Při tomto procesu druhotně vzniká hlavně oxid uhličitý a vodík. [11; 12; 13]

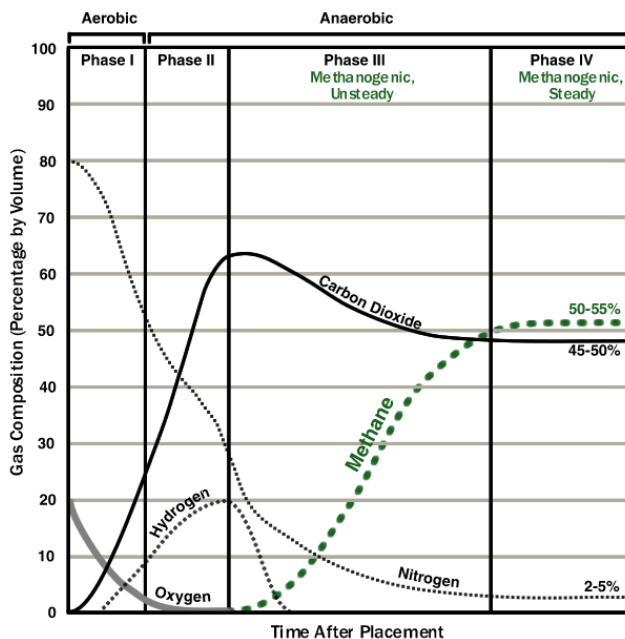
Ve třetí fázi bakterie přeměňují organické kyseliny na octany a jiné organické kyseliny. Vlivem těchto přeměn se začne vytvářet vhodné prostředí pro bakterie produkující metan z oxidu uhličitého a octanů. [11; 12; 13]

Čtvrtá fáze nastává potom, co se složení i objem produkce skládkového plynu stabilizuje. Tato ustálená tvorba může trvat 20 i více let. [11; 12; 13]

Složení a vlastnosti

Odváděný skládkový plyn je směsí bioplynu, vzduchu a těkavých látek. Hlavními složkami je metan oxid a oxid uhličitý. Dále skládkový plyn obsahuje dusík, kyslík, někdy také sulfan. Poměr mezi jednotlivými složkami se mění v závislosti na typu odpadu, fázi rozkladu, teplotě, vlhkosti, míře zhutnění odpadu i na dalších faktorech. [11; 12; 13; 14]

Pokud by se skládkový plyn neodčerpával, hrozilo by jeho šíření do okolí a tvoření výbušné směsi se vzduchem. Nebezpečný je také vznikající oxid uhličitý, který je těžší než vzduch. Ten se hromadí na dně skládky, odkud se může skrz půdu dostat do podzemních prostor jako jsou sklepy nebo tunely, a to i ve značné vzdálenosti od skládky. [11; 12; 13; 14]



Obrázek 2 Složení skládkové plynu v závislosti na čase [11]

1.6 Kalový plyn

Čištěním odpadních vod v čističkách vznikají plyny organického původu označované jako kalový plyn, též čistírenský plyn.

Vznik

Kalový plyn vzniká při anaerobním rozkladu organických látek ve fermentoru a také při anaerobní stabilizaci čistírenského kalu. Přičemž značný vliv na jeho vznik má teplota, při které procesy probíhají. [15]

Složení a vlastnosti

Složení čistírenského plynu je závislé především na složení odpadní vody a surového čistírenského kalu, ale také na stupni rozkladu nebo použité technologii. Hlavní složkou je metan, dále je ve větší míře obsažen i oxid uhličitý. Ve stopovém množství se objevují i mastné kyseliny, či merkaptany. [15]

Tabulka 4 Složení a vlastnosti kalového plynu [15]

Objemové složení					Výhřevnost [MJ/m ³]
CH ₄	CO ₂	N ₂	H ₂	H ₂ S	
[%]					
60 – 75	25 – 35	0,2 – 1	0,2 – 0,5	0,1 – 0,3	18 – 24,8

1.7 Shrnutí

Plyny vznikající při výrobě oceli, bývají často velmi zatíženy prachovými částicemi. Vysokopecní plyn je navíc málo výhřevný. Běžně se tak mísí s konvertorovým i koksárenským plynem, aby se dosáhlo lepší výhřevnosti. Naopak důlní plyn obsahuje relativně málo nečistot i dobrou výhřevnost, a proto je velmi vhodný k dalšímu využití. Skládkový a kalový plyn jsou si svým složením podobné. Pro svůj poměrně vysoký obsah metanu se nejvíce přibližují složení zemnímu plynu. Jejich potenciál je také vysoký.

2 Odstraňování tuhých znečišťujících látek

Odpadní plyny ať už jakéhokoliv původu obsahují tuhé znečišťující látky, které mohou způsobovat řadu problémů ať už se jedná o zanášení potrubí, abrazivní opotřebení vedení, zalpení teplosměnných ploch kotle nebo jiné nepříznivé jevy. V neposlední řadě mají také nepříznivý vliv na člověka i přírodu. Z těchto důvodů je nutné odpadní plyny, pokud možno ihned po vzniku čistit.

Označení tuhé znečišťující látky zahrnuje všechny formy jejich výskytu, pro něž se v češtině často používá konkrétní názvy jako aerosol, dým, popílek nebo prach. Pokud mluvíme o aerosolu máme na mysli směs pevných částic v plynu, jejichž maximální velikost je 1 μm . Pod pojmem dým rozumíme jemné částice (o velikosti 0,1 až 1 μm) rozptýlené v plynu, které vznikly kondenzací par látek. Směs částic vytvořených při nedokonalém spalování tuhých paliv označujeme jako popílek. Částice zde dosahují velikosti od 1 až po 100 μm . Prach je směs pevných částic, jež vznikly mechanickým způsobem (např. mletím, drcením, erozí hornin atp.). Toto slovo můžeme také obecně použít pro všechny soubory pevných částic, pokud není důležitý jejich původ. [16]

Aby došlo k separaci tuhých znečišťujících látek z plynu musí částice prolétat oblastí, kde na ně působí určitá síla, která způsobí odklonění jejich trajektorie od proudu plynu na odlučovací plochy. K tomuto účelu slouží zařízení zvaná odlučovače.

2.1 Suché mechanické odlučovače

Jedná se o jeden z nejrozšířenějších způsobů odstraňování pevných částic z plynu. Fungují na principu gravitační, odstředivé nebo jiné mechanické síly. Mezi jejich největší přednosti patří jednoduchá konstrukce, vysoká spolehlivost, nízké pořizovací náklady, vhodnost i pro vyšší teploty plynu. Hlavní nevýhodou je nízká účinnost odloučení a také neschopnost odloučit jemnější částice. V dnešní době jsou využívány zejména jako předstupeň před jiným typem odlučovače.

Gravitační odlučovače

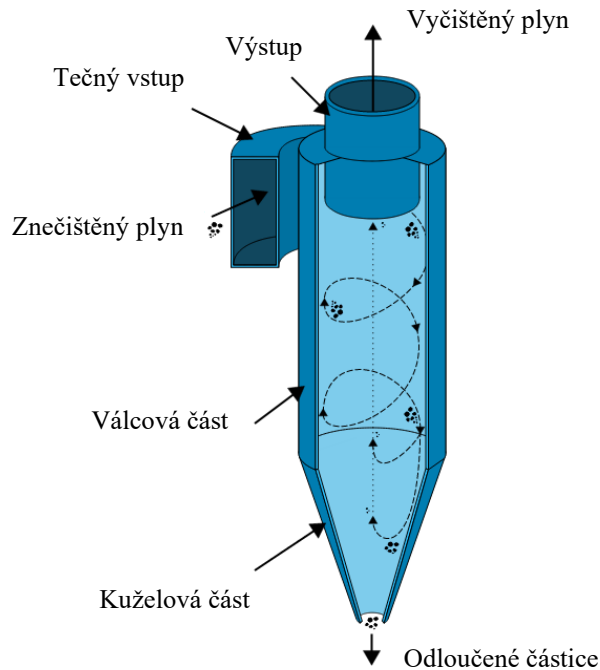
Nejjednodušším odlučovačem jsou usazovací komory, které fungují na principu gravitační síly. Poté, co znečištěný plyn vstoupí do usazovací komory, kde se průřez potrubí značně zvětší, dojde ke snížení rychlosti proudění. Pevné částice se pak vlivem gravitační síly usadí na dně odlučovače, odkud jsou odebírány. [16; 17]

Pro zvýšení efektivity usazování se může komora rozdělit horizontálními deskami. I přesto, ale gravitační odlučovače dosahují odlučivosti maximálně 70 % a zvládnou odloučit jen hrubé částice. Jsou také citlivé na změnu průtoku. Výhodou je naopak nízká tlaková ztráta, vhodnost použití pro vysoké teploty, lepkavé nebo vlhké částice. [16; 17]

Vírové odlučovače (cyklony)

Cyklon je zařízení sestávající z vertikálního válce a kuželovité části vespod. Znečištěný plyn je vháněn do vrchní části válce, tak aby vznikl vířivý šroubovitý pohyb. Prachové částice se odstředivou silou pohybují společně s plynem po obvodu válce a klesají dolů do výpustě prachu. Když plyn dosáhne kuželové části začne se stáčet směrem do středu, kde vzniká stoupající vířivý proud, kterým odchází vyčištěný plyn ven z odlučovače. Pro velké objemy plynu můžou být cyklony řazeny paralelně vedle sebe do tzv. multicyklon. [17; 18]

Vírové odlučovače můžeme rozdělit podle způsobu, jakým uvádí plyn do šroubovitého pohybu. Toho je docíleno tečným vstupem nebo lopatkovým vírníkem vestavěným do vrchní části válce (osový cyklon). [17; 18]



Obrázek 3 Schéma vírového odlučovače [19]

Odlučivost dosahuje až 95 % pro částice s průměrem nad 10 μm . S nižším průměrem částic odlučivost klesá. Částice menší než 1 μm cyklony nezachytí. [18]

Jedná se o nejpoužívanější způsob odlučování pevných částic. Nespornou výhodou je jednoduchá konstrukce (absence pohyblivých částí), tím i nízká pořizovací cena a vysoká spolehlivost. Dále pak možnost použití i při vysokých teplotách a nižší citlivost odlučivosti na změny průtoku. Poklesem průtoku sice dojde ke snížení odstředivé síly, ale částice zůstávají o to déle v odstředivém poli. Hlavní nevýhodou je pak poměrně vysoká tlaková ztráta, která se zvětšuje se zmenšujícím se průměrem válce, i nevhodnost pro čištění plynů s vysokou relativní vlhkostí, kdy může docházet ke kondenzaci a nalepování prachových částic na stěny. [17; 18]

2.2 Mokrý mechanický odlučovač

U těchto odlučovačů jsou pevné částice ve znečištěném plynu přiváděny do kontaktu s kapalinou, která je dobře smáčí. K odloučení tak dochází ulpíváním prachu na mokřích plochách, pohlcením do kapaliny nebo odloučením na povrchu bublin.

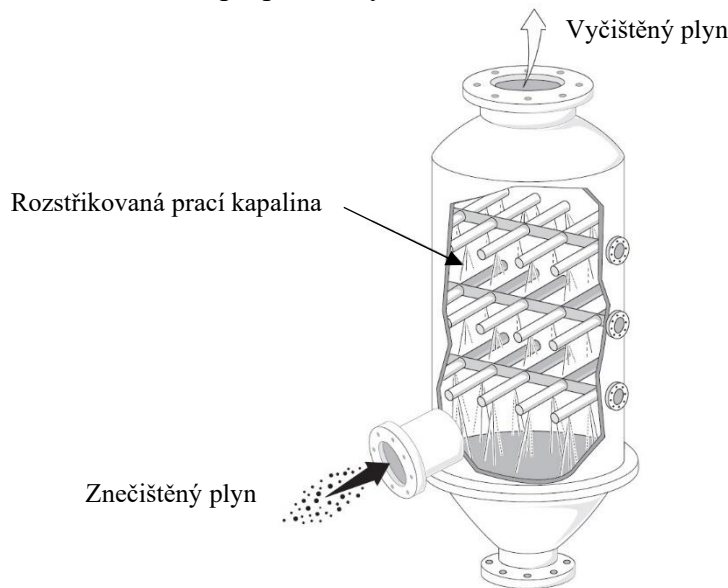
V porovnání se suchými mechanickými odlučovači se dosahuje vyšší odlučivosti, a to i pro jemnější částice. Dále jsou vhodné pro vysoké koncentrace prachu, abrazivní a lepidivé částice. Nevýhodou je nutnost kalového hospodářství, nebezpečí koroze, nebezpečí zamrzání nebo například vyšší tlaková ztráta u některých typů.

Sprchové odlučovače

Sprchové věže mají zpravidla tvar válce postaveného svisle. Čištěný plyn proudí odspodu nahoru. Naopak kapalina hromadí se na dně je čerpána do horní části věže, kde je rovnoměrně rozstříkována směrem dolů. Část znečištěné kapaliny je postupně vypouštěna a nahrazována čistou. Pokud je válec umístěn vodorovně, pak mluvíme o sprchových komorách. [16; 18; 20]

Aby s proudem plynu nebyly strhávány kapky, nesmí jeho rychlost překročit 1,5 m/s. Tlaková ztráta není příliš vysoká, avšak měrná spotřeba kapaliny je značná. [16]

Sprchové odlučovače mají relativně nízkou účinnost odlučování, ale dokáží plyn také ochladit a zvýšit jeho obsah vodní páry, proto se používají hlavně jako první stupeň v kombinaci s jiným odlučovačem např. proudovým.



Obrázek 4 Schéma sprchové věže [21]

Vírové odlučovače

Mokrý vírový odlučovač jsou velmi podobné suchému cyklonu. U mokrého vírového odlučovače je na rozdíl od suchého cyklonu do plynu rozprašována kapalina, jež se s pevnými částicemi vlivem odstředivých sil unášena na obvodové stěny válce, po kterých stéká dolů. Kal je odváděn trubkou ve spodní části. [16; 18; 20]

Obdobně jako u multicyklonu lze paralelním řazením docílit vyšší efektivity odlučování. Oproti suchým vírovým odlučovačům jsou ty mokré schopny odlučovat i abrazivní nebo lepeivé částice. [16; 18]

Hladinové odlučovače

Tyto odlučovače pracují na principu strhávání kapaliny plynem, který proudí vysokou rychlostí skrze štěrbinami těsně nad hladinou. Ve štěrbinách dochází při mísení kapaliny a plynu k odlučování pevných částic. Znečištěná kapalina se vrací zpět do nádrže. Odloučené částice se odebírají ze dna ve formě kalu. Odlučovač kapek na výstupu zabráňuje nežádoucímu unášení kapek [17; 18; 20]

Jedná se o nejpoužívanější typ mokrého odlučovače. Dosahují odlučivosti přes 90 % pro částice větší než 1 μm . Tlaková ztráta je vyšší, pohybuje se kolem 1400 Pa. [18]

Pěnové odlučovače

Pěnový odlučovač tvoří několik pater, obvykle dva až tři, která jsou kruhového nebo čtvercového průřezu. Každé patro je tvořeno deskou s kruhovými otvory nebo roštem se štěrbinami a vrstvou kapaliny, nejčastěji vody. Hladina kapaliny je v každém patře udržována pře-padovým kanálem. Plyn zespodu prochází jednotlivými patry, kde se při průchodu kapalinou tvoří nestabilní pěna, v níž jsou pohlcovány jak pevné částice, tak i některé plynné složky. Spolu s čištěním se plyn také ochlazuje. V horní části je umístěn odlučovač kapek. [17; 18; 20]

Odlučivost je pro částice větší než 5 μm přes 98 %, ale pro menší části prudce klesá. Pro částice o velikosti 1 μm je odlučivost nižší než 50 %. Z toho důvodu jsou používány pro odlučování hrubších částic. Odlučivost je také ve velké míře ovlivňována změnami průtoku

plynu, kdy při nedostatečném průtoku nedochází k tvorbě pěny. Tlaková ztráta se odvíjí od počtu pater, přičemž ztráta na je jedno patro je přibližně 300 Pa. [17; 18]

Proudové (Venturiho) odlučovače

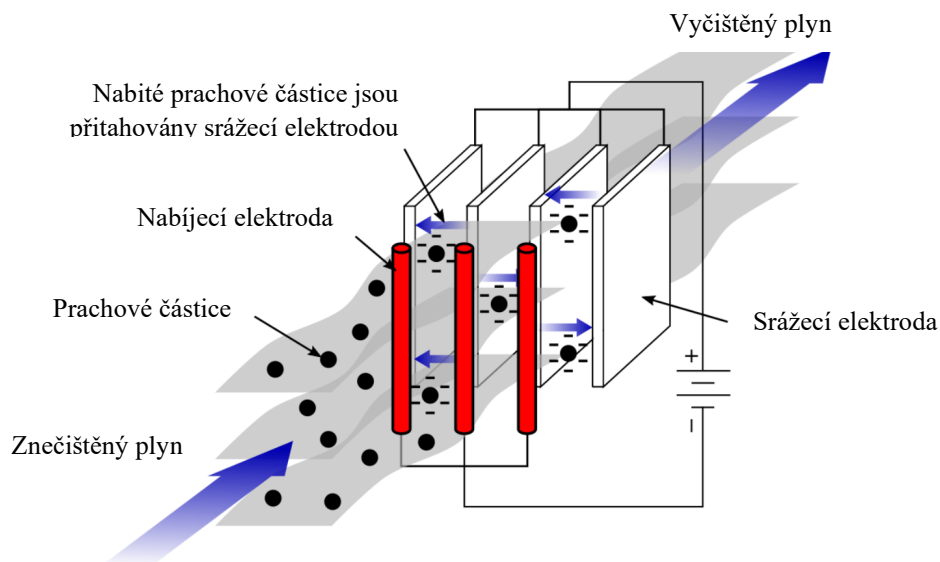
Odlučování pevných částic v těchto odlučovačích je dosaženo vstřikováním kapaliny do rychle proudícího plynu v trubici s měnící se velikostí průřezu (Venturiho trubici). Tím se kapalina rozpráší na velmi malé kapičky. V zúžené části trubice mají kapky mnohem nižší rychlost než plyn, ale s rozšiřujícím se průměrem začne rychlost plynu klesat až jsou kapky rychlejší. Rozdíl těchto rychlostí způsobuje četné srážky pevných částic s kapkami, které je pohlcují. Na výstupu je odlučovač kapek pracující podobně jako cyklon. [17; 18; 20]

Konstrukce jednotlivých odlučovačů se může lišit způsobem, jakým je voda přiváděna do plynu, a to axiální tryskou, tryskami po obvodu trubice nebo volným strháváním kapaliny po stěnách, potom hovoříme o hladinovém proudové odlučovači. [17; 18]

S účinností 98 % pro částice velikosti přes 0,5 μm dosahují proudové odlučovače nejvyšší odlučivosti ze všech mokrých odlučovačů. Používají se tedy tam, kde je potřeba dokonale vyčištěný plyn, a to i přes vysoké provozní náklady způsobené velkou tlakovou ztrátou, až 5 kPa. [17; 18]

2.3 Elektrostatické odlučovače

Elektrostatické odlučování pevných znečišťujících látek funguje na principu přitažlivých elektrostatických sil. Nabíjecí (též vysokonapěťová nebo sršící) elektroda tvořená většinou drátem malého průřezu je připojena na zdroj vysokého napětí a vytváří elektrostatické pole. Pevné částice se při průletu tímto polem nabíjejí elektrickým nábojem a jsou přitahovány k opačně nabitě sběrací (srážecí) elektrodě. Srážecí elektroda má velkou plochu a je vhodně tvarovaná, aby nedocházelo k opětovnému strhávání ulpělého prachu do proudu plynu. Odstraňování prachu z elektrod je buď suché s použitím mechanických kladívek nebo mokré, postříkem kapalinou. [16; 17; 18; 22]



Obrázek 5 Schéma deskového elektrostatického odlučovače [23]

Elektrostatické odlučovače se vyznačují vyšší odlučivostí i pro jemné částice, nízkou tlakovou ztrátou (do 200 Pa) a vhodností pro vysoké teploty a průtoky. Oproti tomu je v neprospěch vysoká pořizovací cena, velká citlivost na změnu složení částic a nevhodnost pro částice s hodně nízkým nebo naopak vysokým elektrickým odporem. [16]

Vertikální trubkové odlučovače

Jsou tvořeny soustavami sběracích elektrod v podobě trubek kruhového nebo šestiúhelníkové průřezu, jejichž středem prochází nabíjecí drátová elektroda. Proud znečištěného plynu proudí odspoda nahoru.

Nevýhodou je nutnost zajištění rovnoměrného rozdělení průtoku do všech trub a také částečné strhávání usazených částic zpět do plynu při oklepu z elektrod. Používají se zejména při čištění za nízkých teplot, kdy u tohoto typu nedochází ke změně konstrukce vlivem teplotní roztažnosti. [16]

Horizontální deskové odlučovače

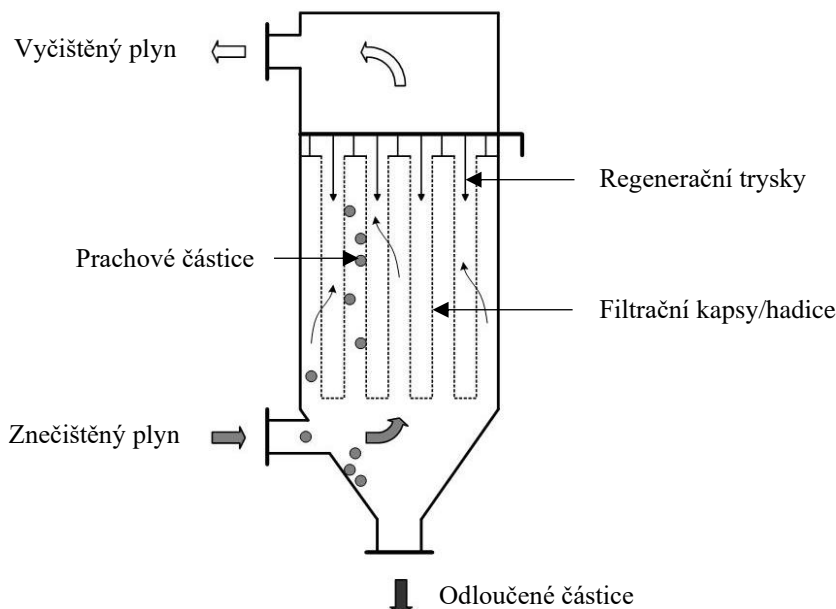
V horizontálních deskových odlučovačích proudí plyn mezi deskovými sběracími elektrodami, mezi kterými jsou uprostřed umístěny drátové nabíjecí elektrody.

Výhodou je částečné oddělení směru pádu odděleného prachu od směru proudu plynu. To umožňuje dosáhnout vyšší odlučivosti. Nevýhodou je rozměrná konstrukce a tím velký zastavěný prostor. Nejčastěji se využívá pro čištění plynů při vysokých teplotách. [16]

2.4 Filtry

Filtrace je proces odlučování znečišťujících pevných látek průchodem filtrační vrstvou. Částice, jež neprojdou skrze otvory v této vrstvě, se začnou zachytávat na povrchu. Vzniká filtrační koláč, který je sám o sobě filtrační vrstvou zvyšující účinnost odlučování.

Filtrační materiál, z něhož je vyrobena filtrační vrstva, můžeme rozdělit do tří skupin: filtrační textilie, zrnité vrstvy, porézní materiály. Filtrační tkaniny se vyrábějí nejčastěji vpičováním z přírodních i syntetických vláken. Pro vyšší teploty se používají textilie tkané ze sklených, uhlíkových nebo kovová vlákna. [16; 17; 18; 22]



Obrázek 6 Schéma tkaninového filtru [24]

Tím, jak se tvoří filtrační koláč, zvyšuje se tlaková ztráta, proto je nutné provádět regeneraci filtru. Ta se provádí buď zpětným proplachem, pulzním profukem nebo mechanickým sklepáváním. Při zpětném proplachu je filtr rozdělen na sektory. Část již vyčištěného plynu z aktivního sektoru je opačným směrem vháněna do regenerujícího se sektoru. Pulsní profuk může probíhat po menších celcích a za provozu. Na filtrační vrstvu je pomocí stlačeného vzduchu v určitých intervalech vyvolán tlakový impuls. Mechanická regenerace se využívá jen

u filtrace hrubých částic nebo v kombinaci s jinou metodou. Odloučený prach padá do násypky odkud je odebírán. [16; 17; 18; 22]

Nejběžnější jsou filtry z tkaniny. Podle konstrukce, pak rozlišujeme filtry hadicové a kapsové. [16]

Výhodou filtrů je vysoká odlučivost velmi jemných částic a jednoduchá konstrukce. Nevýhodou pak velký obestavěný prostor, vysoká tlaková ztráta a nevhodnost pro lepivé, vlhké částice, které by ucpávaly filtrační vrstvu. [22]

2.5 Shrnutí

Suché mechanické odlučovače nemají tak vysokou odlučivost. Naopak filtry dokáží zachytit i velmi jemné částice. Jejich společným znakem je jednoduchá a spolehlivá konstrukce, která je předurčuje k širokému použití, a to i pro menší objemy čištěného plynu. Naopak mokré mechanické odlučovače, jsou vhodné tam, kde je k dispozici kalové hospodářství a pro vyšší objemy plynu. Současné ochlazení plynu může být v některých případech výhodné.

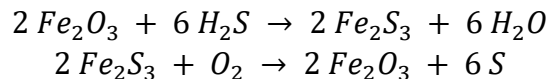
3 Odstraňování sirných sloučenin

Nežádoucí látkou obsaženou v odpadní plynech je síra, a to nejčastěji ve formě prudce jedovatého sulfanu. Spalováním síry, respektive sulfanu totiž vzniká oxid siřičitý a oxid sírový. Tyto plyny mimo znečišťování životního prostředí také reagují s vodní párou za vzniku kyseliny sírové způsobující silnou korozi, která může vést až k závažnému poškození zařízení.

Odsiřovací metody můžeme rozdělit na suché (adsorpční), kdy se síra odlučuje z plynu na pevnou látku a mokré (absorpční), při kterých síra přechází do kapaliny.

3.1 Adsorpce čisticí hmotou

Při tomto procesu dochází k exotermní oxidaci sulfanu na síru, která je zachycena na sorbentu tvořeném oxidem železitým a aktivním uhlím: [25]



Částice čisté síry, které se usazují na zrnkách čisticí hmoty difundují dovnitř, a naopak oxid železitý se dostává na povrch. Postupně však dochází ke snižování účinnosti odsiřování. Po určité době je tedy nutné hmotu obnovit. [25]

Odsiřování tímto způsobem může probíhat v horizontálních komorách s jednou nebo i více vrstvami sorbentu uloženého na roštích. V případě, že je potřeba čistit větší objemy plynu volí se čisticí věže, kde je sorbent uložen ve vyjímatelných koších. [25]

3.2 Regenerativní metody

Tyto metody řadíme jako mokré. Prací kapalina je v pračce (absorbéru) nasycena sulfanem z čištěného plynu. Následně pokračuje do vypuzovací kolony (desorbéru), v kterém za zvýšené teploty a normálního tlaku, přetlaku nebo podtlaku dochází k odpařování sulfanu z kapaliny. Desorbovaná kapalina se vrací zpět do absorbéru. [25]

Jednotlivé procesy se liší hlavně v konstrukci absorbéru, desorbéru, vedení kapaliny a také v druhu použité kapaliny. Těmi mohou být například soli vícesytných netěkavých kyselin. Dále mohou být použity zásady, které za normální teploty reagují se sulfanem za vzniku sulfidů, které se při zvýšení teploty opět rozpadnou na zásadu a sulfan. Jedná se například o hydroxid hořečnatý, hydroxid amonný nebo etanolaminy. Rozšířené jsou také soli slabých kyselin, jež mají za normální teploty nižší, ale při zvýšené teplotě vyšší hodnotu disociační konstanty než sulfan (např. fenoly, aminokyseliny, kyselina uhličitá). [25]

Všechny používané kapaliny mohou kromě sulfanu rozpouštět také oxid uhličitý. Tento jev může být v některých případech považován za nežádoucí, protože zvyšuje nároky na množství cirkulující kapaliny a energii potřebnou k jejímu ohřátí. Zabraňuje se mu minimalizací času styku kapaliny s plynem, kdy oxid uhličitý nemá dostatek času na odloučení. [25]

Všechny tyto metody mají jednu společnou nevýhodu, prací kapalina má i po regeneraci malý obsah sulfanu, proto nelze docílit úplného odsíření plynu. Často tedy ještě následuje suché dočištění.

3.3 Shrnutí

Regenerativní metody čištění jsou ekonomicky mnohem výhodnější. Vhodné může být také současné odlučování oxidu uhličitého. Pokud je ovšem potřeba vysoká čistota plynu je nutné použít i adsorpce čisticí hmotou.

4 Odstraňování oxidu uhličitého

Oxid uhličitý nezpůsobuje korozi ani není nijak zvlášť nebezpečný pro životní prostředí. Přesto je považován za nežádoucí, protože při spalování působí jako inhibitor. Jeho odlučováním tak dochází ke značnému zvýšení výhřevnosti daného plynu.

4.1 Adsorpce střídáním tlaků

K odlučování dochází ve vertikálním válci vázáním oxidu uhličitého na sorbent za vysokého tlaku. Jako sorbent se zde využívá aktivní uhlí, uhlíková molekulová síta nebo zeolity. Vyčištěný plyn je odebírán z horní části. Po určité době je nutné provést regeneraci. Ta se provádí profukem za sníženého tlaku, kdy se oxid uhličitý uvolňuje ze sorbentu. Pro kontinuální čištění se tedy často využívá paralelní zapojení dvou jednotek. [26]

Výhodou této metody jsou nízké energetické, investiční nároky a malý zastavěný prostor. Může však docházet také k odlučování metanu. [26]

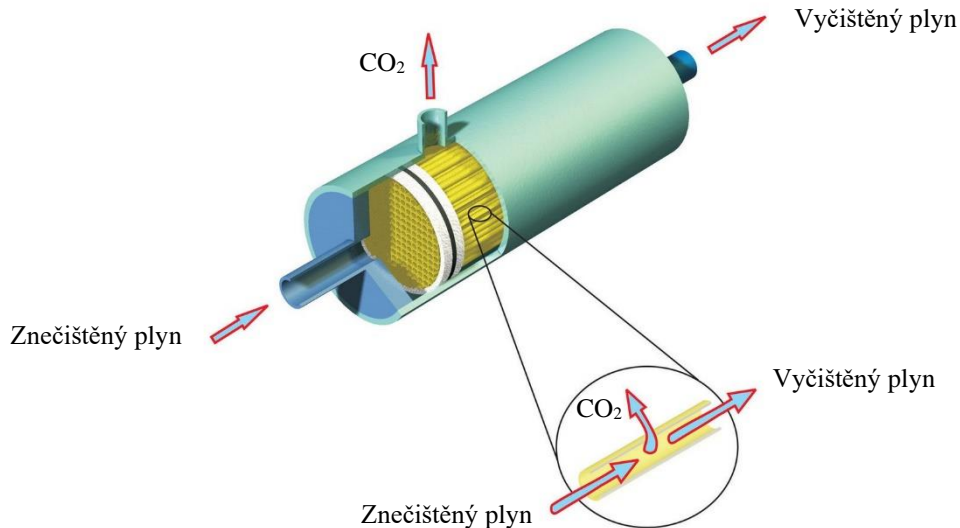
4.2 Regenerativní metody

Jak už bylo zmíněno tyto metody jsou schopné odlučovat jak sulfan, tak také oxid uhličitý. Viz kapitola 3.2 Regenerativní metody odstraňování siřných sloučenin.

4.3 Membránové metody

Princip těchto metod spočívá v proudění plynu membránovými trubicemi, přičemž nežádoucí látky jako oxid uhličitý (ale také sulfan) pronikají skrze membránu. Trubice jsou většinou tvořeny dutými vlákny z polymerů, polyamidy, polysulfidy. Odlučování může probíhat jak suchým způsobem, tak za použití kapaliny. [26]

Membránová separace je šetrným způsobem odlučování oxidu uhličitého, kterou je možné docílit velmi vysoké odlučivosti. Vyznačuje se také konstrukční jednoduchostí i nízkými nároky na údržbu i provoz. Není také citlivá na složení a množství čištěného plynu. [26]



Obrázek 7 Schéma membránového odlučovače [27]

4.4 Shrnutí

Adsorpce střídáním tlaků je levná a široce využívaná metoda separace oxidu uhličitého. V dnešní době je však vytlačována membránovými metodami, které mají vyšší odlučivost a jednoduchou konstrukci.

5 Sušení

Sušení plynů vede k snížení teploty rosného bodu, tak aby při provozních teplotách a tlacích nedocházelo k nechtěné kondenzaci vody, která následně koroduje potrubí a může způsobovat celou řadu dalších problémů.

5.1 Adsorpční metody

V těchto případech se k odlučování vodní páry používá pevná pórovitá látka např. bauxit, aktivní oxidy hliníku nebo silikagely. S vlhkostí se však z plynu často odlučují i jiné látky zanášející póry a vytvářející sloučeniny, které nelze odstranit regenerací, proto se nepoužívají pro plyny s obsahem uhlovodíků. [5; 25]

5.2 Absorpční metody

K sušení se zde využívají hygroskopické roztoky, jež jsou rozstříkovány do plynu v absorbéru. Regenerace probíhá v desorbéru za zvýšené teploty. Jako prací kapaliny se využívá koncentrovaný roztok chloridu litného, dietylenglykolu nebo trietylenglykolu. [5; 25]

5.3 Vymrazovací metody

Vymrazovací metody jsou založeny na fyzikálním principu, kdy je plyn stlačen i ochlazen, čímž přejde do přesyceného stavu a přebytečná vlhkost zkondenzuje. Následně je kondenzát odveden a plyn expanduje na svůj původní tlak. Tyto metody jsou oproti předchozím uvedeným účinnější a lze jimi dosáhnout velmi nízké teploty rosného bodu, ovšem za cenu vysoké energetické náročnosti. [5]

5.4 Shrnutí

V případě, kdy je nutné dosáhnout velice nízké teploty rosného bodu, je nutné využít vymrazovací metody i přes její vysoké energetické náklady. Dnes se ovšem nejběžněji používá sušení absorpční metodou, zejména trietylenglykolem.

6 Spalování odpadních plynů

Odpadní plyny, které projdou potřebnou úpravou a vyčištěním je možné spalovat v plynových hořácích za účelem výroby tepelné energie nebo v kogeneračních jednotkách pro elektřinu a teplo. Pokud má plyn dostatečné parametry, srovnatelné se zemním plynem může být stlačován a využíván jako palivo pro automobily či také vháněn do plynové distribuční sítě. Tyto možnosti však zatím nejsou moc rozšířené.

6.1 Plynové hořáky

Hořáky slouží k přeměně chemické energie paliva na energii tepelnou. Palivo je smícháváno s okysličovadlem (nejčastěji se vzduchem) a následně spalováno. Podle přivádění spalovacího vzduchu do hořáku je můžeme rozdělit na ejekční hořáky a na hořáky s nuceným přívodem spalovacího vzduchu. Podle tlaku přiváděného paliva rozlišujeme:

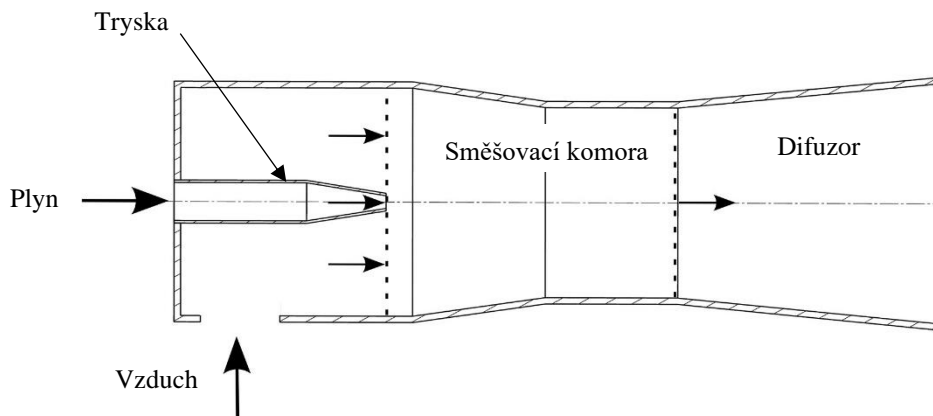
- nízkotlaké hořáky – přetlak paliva do 5 kPa
- střednětlaké hořáky – přetlak paliva 5 až 300 kPa
- vysokotlaké – přetlak paliva nad 300 kPa. [1]

Ejekční hořáky

U ejekčních hořáků dochází k úplnému mísení spalovacího vzduchu, který je strháván společně s palivem proudícím z trysky. Zdroj spalovací vzduchu tedy není u těchto hořáků potřeba. [1]

Nízkotlaké ejektorové hořáky (též atmosférické hořáky) jsou velmi rozšířené, zejména u domácích spotřebičů, ale i v průmyslu. Do směšovače je vlivem nízkého tlaku přisávána jen část potřebného množství vzduchu. Zbytek je tahem spotřebiče přiváděn do plamene. [1]

Tento problém odpadá u střednětlakých hořáků (též injektorové hořáky), které nasávají všechny potřebný vzduch. Používají se zejména pro výhřev průmyslových pecí a jiných zařízení. [1]



Obrázek 8 Schéma ejektorového hořáku [28]

Hořáky s nuceným přívodem vzduchu

K přívodu spalovacího vzduchu obvykle slouží radiální ventilátor. Vzduch může být studený nebo předehřátý v regenerátoru či rekuperátoru. Ve většině případů je využíváno paliva s přetlakem do 5 kPa a vzduch s přetlakem 1 až 6 kPa. [1]

Tyto hořáky jsou používány zejména pro otop velkých energetických kotlů nebo jako zdroj tepla pro průmyslové pece a jiné průmyslové provozy. [1]

6.2 Kogenerační jednotky

Pojem kogenerace označuje současnou výrobu dvou forem energie, nejčastěji elektrické a tepelné. Často můžeme narazit také na zkratku KVET (kombinovaná výroba elektřiny a tepla) nebo CHP (z anglického Combined Heat and Power). Synonymem je také teplárenská výroba.



Obrázek 9 Porovnání energetické účinnosti kogenerace [29]

Sdružená výroba elektrické a tepelné energie probíhá v zařízeních zvaných kogenerační jednotky. Ty umožňují využití energetického potenciálu paliva s mnohem vyšší účinností. V porovnání s oddělenou výrobou může dojít k úspoře paliva až o 40 % a celková účinnost kogeneračních jednotek může dosahovat až 90 %. [30]

Kogenerační jednotky se spalovacími motory

Tento typ kogeneračních jednotek se skládá z pístového motoru s vnitřním spalováním, který je pomocí hřídele přes spojku spojen s asynchronním nebo synchronním elektrickým generátorem. Teplo je odebíráno pomocí soustavy tepelných výměníků z motoru, mazacího oleje a spalin nejčastěji ve formě horké vody určené nejčastěji k vytápění. [30]

Spalovací motory pro kogeneraci vychází z klasických spalovacích motorů používaných pro pohon automobilů, lodí atp. Můžeme je rozdělit podle několika kritérií jako např. počet pístů nebo rychlosti otáčení hřídele. Nejběžněji se však rozdělují podle způsobu zapalování paliva na vznětové pracující podle Dieselova cyklu a zážehové, které využívají Ottův cyklus. [30]

K zapálení dochází u vznětových motorů samovznícením při vstřiku paliva do horkého stlačeného vzduchu. Tyto motory mohou dosahovat výkonů až 25MW a účinnosti až 45 %. Dieselův cyklus pracuje s velkými tlaky a teplotami, proto vznětové motory využívají zejména kapalná paliva. Existují také duální vznětové motory, které spalují plyn jako hlavní palivo a kapalné palivo slouží pouze ke vznícení. [30; 31]

U zážehových motorů se zapálení paliva provádí pomocí elektrické jiskry, tudíž tyto motory nemají tak vysoké nároky na palivo a jsou schopny spalovat pouze plyn. Nedosahují však takových výkonů jako vznětové motory, ani takové účinnosti, obvykle od 37 % do 43 %. [30; 31]

Výhodami použití spalovacích motorů v kogeneraci jsou vysoká celková účinnost kogenerace (pro velké motory až 84 %), krátký čas nájezdu a odstavení nebo malé prostorové nároky. Naopak negativně můžeme hodnotit spotřebu maziva, vysoký hluk a vyšší nároky

na údržbu. Využívají se zejména v průmyslových areálech, čističkách odpadních vod nebo na skládkách komunálního odpadu. [30; 31]

Dvacet pět kontejnerových kogeneračních jednotek se spalovacím motorem a s celkovým výkonem až 2000 kW je spolehlivě provozováno na Ostravsku a Karvinsku. Jednotky jsou instalovány v místech uzavřených dolů, kde spalují důlní plyn. Dodávají tak elektřinu do sítě a teplem zásobují přilehlé domy a průmyslové areály. Oproti původnímu stavu, kdy byl odčerpáný důlní plyn spalován ve flérách bez užitku, došlo v okolí k výraznému snížení škodlivých emisí. V budoucnu až dojde k poklesu tvorby plynu mohou být kontejnery převezeny k novému ložisku. [32]



Obrázek 10 Kontejnerová kogenerační jednotka určená ke spalování odpadních plynů [32]

Kogenerační jednotky s parní turbínou

Kogenerační jednotky poháněné parní turbínou fungují podle Rankinova-Clausiova cyklu. Ve spalovací komoře parogenerátoru je spalováno palivo (např. odpadní plyn). Vzniklé teplo je předáváno vodě o vysokém tlaku, čímž se vytváří vysokopotenciální pára. Parní turbína pak přemění tlakovou a kinetickou energii páry na mechanickou energii, která je pomocí připojeného generátoru převáděna na energii elektrickou. [30; 31]

Parní turbíny určené pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla rozdělujeme na protitlakové a kondenzační s odběrem páry. [30]

V protitlakové turbíně je na elektrickou energii přeměněna jen část tepelné energie páry. Z turbíny tak vytéká pára o vysoké teplotě i vyšším tlaku, než je tlak atmosférický. Ta je dále vedena do výměníku tepla, kde odevzdá zbytek tepelné energie pro další využití a kondenzuje na vodu. Voda je čerpána zpět do parogenerátoru. Primární je v tomto případě výroba tepelné energie. [30]

Kondenzační turbíny na druhé straně slouží především k produkci elektřiny. Pára v turbíně ztrácí většinu své energie, na výstupu má tedy nízkou teplotu i tlak a nedá se dále energeticky využít. Pro teplotní účely se pak odebírá část páry z vhodného místa z turbíny nebo dokonce přímo z parogenerátoru. U těchto turbín odpadá závislost výroby elektrické energie na té tepelné. Odběrem páry lze také regulovat jejich poměr. [30]

Parní turbíny se využívají hlavně jako velké zdroje energie, protitlakové zejména v tepelnárnách a kondenzační s odběrem páry zase v elektrárnách, nebo velkých průmyslových podnicích používající páru pro technologické účely. [31]

Na rozdíl od kogeneračních jednotek se spalovacími motory jsou ty s parní turbínou schopné dodávat tepelnou energii v libovolné formě, jako horkou vodu, ale také jako nízkotlakou nebo vysokotlakou páru. Mohou spalovat jakékoliv palivo a dosahují vysoké účinnosti s dlouhou životností. Nejsou však tak flexibilní, jejich najíždění a odstavení je pomalé. Jedná se o komplikovaná zařízení s řadou podsystémů, což klade velké nároky na zastavěný prostor, údržbu i investiční náklady. [31]

Kogenerační jednotky s plynovou turbínou

Spalovací turbína sestává z hřídele, na kterém je osazen turbokompresor, samotná turbína a přes převodovku připojený generátor elektrické energie. Turbo kompresor stlačuje vzduch nasátý z okolí. Ve spalovací komoře je do proudu vzduchu vstříkováno palivo. Směs hoří za vzniku spalin o vysokém tlaku i teplotě. Spaliny jsou přiváděny do plynové turbíny, kde svou expanzí roztáčí hřídel. Mechanická energie hřídele je použita na pohon turbokompresoru a přebytek přeměněn na elektrickou energii v generátoru. [31]

Kogenerační jednotky s plynovou turbínou se pro spalování odpadních plynů v praxi nepoužívají, protože vyžadují vysokou čistotu paliva i stálost jeho složení a výhřevnosti.

6.3 Automobily na plynná paliva

Čištěním bioplynu ať už v podobě skládkového nebo kalového plynu můžeme získat plyn nazývaný biometan, též bio-SNG (z anglického synthetic natural gas nebo substitute natural gas). Biometan se svými parametry blíží zemnímu plynu, obsah metanu je minimálně 95 %. Stlačený biometan označujeme jako bio-CNG (z anglického bio compressed natural gas). Takový plyn je pak možné použít jako palivo pro upravené spalovací motory automobilů. [26]

Využívány jsou hlavně vznětové motory, které mohou být podobně jako u kogeneračních jednotek duální. Spalují tedy primárně bio-CNG, ale vznícení paliva se podporuje vstříkáváním motorové nafty. V dnešní době už existují i tzv. monovalentní vznětové motory spalující pouze biometan. Případně je možné použít také zážehové motory, u kterých je palivo zapalováno elektrickou jiskrou. [33]

Z důvodu omezeného množství plnicích stanic se v dnešní době stlačený biometan využívá hlavně jako palivo pro autobusy městské hromadné dopravy a popelářské vozy. Dalším limitujícím faktorem, zejména pro osobní automobily jsou nádrže na skladování plynu, které zabírají podstatně více místa ve srovnání s klasickými nádržemi na motorovou naftu či benzín. Pro své rozměry tak bývají umísťovány nejčastěji na střeche vozidla. [33]

Spalováním stlačeného bio-CNG dochází k podstatně menšímu uvolňování emisí oxidu uhličitého, oxidu uhelnatého a pevných částic oproti běžně používaným fosilním palivům, což má významný vliv na životní prostředí. [33]

V Brně probíhal dvoutříměsíční testovací provoz s autobusem Iveco Urbanway 12M CNG, který místo CNG využíval biometan z čističky odpadních vod v Modřicích. Autobus během testování najel přes 4750 km bez většího problému. Vyzkoušena byla také směs biometanu s CNG. Dopravní podnik města Brna má velký zájem o provoz autobusů na biometan. Bohužel zatím v Brně není dostupný žádný větší zdroj. Čistírna odpadních vod v Modřicích využívá kalový plyn pro ohřev vlastních čistírenských procesů a nadbytečné množství biometanu je dostačující pouze pro 5 autobusů. [34; 35]



Obrázek 11 Iveco Urbanway 12M CNG s viditelnou nádrží na CNG na střeše [36]

6.4 Shrnutí

Plyny z hutních procesů jsou spalovány zejména v plynových hořácích. Teplo, které vzniká je pak opět použito při výrobních operacích. Kogenerační jednotky naopak umožňují výrobu elektrické i tepelné energie. Společná výroba se pak vyznačuje vysokou účinností. Pro spalování důlních, kalových a skládkových plynů jsou nejčastěji využívány ty s pístovými spalovacími motory. Biometan jako palivo pro automobily se dnes ještě příliš nerozšířil. Díky nízkým emisím, jež vznikají při spalování, má tato technologie velký potenciál se dále rozvíjet.

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo vypracovat přehled odpadních plynů, shrnout technologie odstraňování znečišťujících látek a možnosti využití jako alternativního paliva.

Odpadní plyny vznikají při celé řadě průmyslových procesů. Například hutnictví je významným producentem vysokopecního, koksárenského a konvertorového plynu. Mohou se ale také vytvářet přírodními neřízenými procesy. Takto vzniká například důlní plyn, který se uvolňuje z podzemních kapes, nebo skládkový a kalový plyn produkovaný bakteriemi při rozkladu organické hmoty. Jednotlivé odpadní plyny a jejich vlastnosti byly popsány v první části práce.

Odpadní plyny obsahují celou řadu nečistot, které mohou způsobovat celou řadu problémů. V druhé části práce tak byly shrnuty technologie k jejich odlučování. Tuhé znečišťující látky jsou příčinou zanášení potrubí, abrazivního opotřebení a dalších negativních jevů. K jejich odstranění se využívá hned několika metod ať už mechanických suchých nebo mokrých, elektrostatických či pomocí filtrů. Sírné sloučeniny (zejména sulfan) zapříčiňují korozi zařízení i vznik nebezpečných sloučenin při spalování. Odlučování je možné opět hned několika způsoby, a to jak adsorpcí na čistírenské hmotě, tak mokřými regenerativními způsoby. Oxid uhličitý zase tlumí hoření a tím snižuje výhřevnost plynu. Dnes se k jeho odloučení nejčastěji využívá membránová metoda, ale můžeme se setkat také s metodou změny tlaků nebo je odlučován společně se sulfanem mokřými regenerativními způsoby. Vlhkost způsobuje korozi a k jeho odstranění se využívá adsorpce, absorpce či vymrazování.

Poslední část práce byla zaměřena na samotné spalování odpadních plynů. Nejjednodušší je spalování pomocí plynových hořáků za účelem výroby tepelné energie. Nejčastěji plyny vzniklé při výrobě oceli jsou takto využity pro ohřev dalších hutnických operací. Výroba elektřiny společně s teplem v kogeneračních jednotkách má hned několik výhod, tou nejvýznamnější je vysoká účinnost. Kogenerace je dnes široce využívána zejména pro spalování důlního, skládkového a kalového plynu. Stlačený biometan může být také použit jako palivo pro automobily. I přes velký potenciál tento způsob v současné době stále ještě nedosáhl velkého rozšíření.

Odpadní plyny nebudou nikdy produkovány v takovém množství a kvalitě, aby pokryly veškerou energetickou spotřebu. Jejich smysluplným využitím však může být dosaženo zásadních finančních úspor i omezení spalování fosilních paliv, čímž se zmírní dopad na životní prostředí.

Seznam použitých zdrojů

- [1] FÍK, Josef. *Spalování plyných paliv a plynové hořáky*. Praha: GAS, 1998. Informační systém GAS. ISBN 80-861-7601-0.
- [2] RYBÍN, Miroslav. *Spalování paliv a hořlavých odpadů v ohništích průmyslových kotlů*. 2., přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1985. Řada strojírenské literatury. ISBN spalování paliv a hořlavých.
- [3] Pec vysoká. In: *Leporelo.info* [online]. [cit. 2022-05-5]. Dostupné z: <https://leporelo.info/pec-vysoka>
- [4] Blast Furnace gas generation and usage. In: *IspatGuru* [online]. [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.ispatguru.com/blast-furnace-gas-generation-and-usage/>
- [5] PERNA, František a Rudolf RIEDL. *Plynárenství / sv. II*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1957, 517 s.
- [6] Converter Gas, its Characteristics and Safety Requirements. In: *IspatGuru* [online]. [cit. 2022-05-5]. Dostupné z: <https://www.ispatguru.com/converter-gas-its-characteristics-and-safety-requirements/>
- [7] Výroba oceli v kyslíkových konvertorech a odlévání. In: *NejenHORNICTVÍ.info* [online]. [cit. 2022-05-5]. Dostupné z: <http://podzemi.solvayovylomy.cz/prirucka/zprac/ocel/ocel.htm>
- [8] Coke Oven Gas Generation and Usage. In: *IspatGuru* [online]. [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.ispatguru.com/coke-oven-gas-generation-and-usage/>
- [9] Koksovny. In: *NejenHORNICTVÍ.info* [online]. [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <http://podzemi.solvayovylomy.cz/prirucka/zprac/koksovny/koks.htm>
- [10] Coke Oven Gas Generation and Usage. In: *IspatGuru* [online]. [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.ispatguru.com/coke-oven-gas-generation-and-usage/>
- [11] Basic Information about Landfill Gas. In: *U.S. Environmental Protection Agency* [online]. [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas>
- [12] Landfill Gas Primer - An Overview for Environmental Health Professionals. In: *Agency for Toxic Substances and Disease Registry* [online]. [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.atsdr.cdc.gov/HAC/landfill/html/intro.html>
- [13] Landfill gas – a by-product of waste management. In: *Waga Energy* [online]. [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://waga-energy.com/en/everything-about-landfill-gas/>
- [14] CÁB, Stanislav a Martina ŠEDĚNKOVÁ. Rizika vzniku a kumulace hořlavých plynů při skládkování odpadů. In: *TZB-info* [online]. [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/18395-rizika-vzniku-a-kumulace-horlavych-plynu-pri-skladkovani-odpadu>
- [15] VÍTĚZ, Tomáš a Bořivoj GRODA. *Čištění a čistírny odpadních vod*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2008. ISBN 978-80-7375-180-7.
- [16] HEMERKA, Jiří. *Odlučování tuhých částic*. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1995. ISBN 80-010-1088-0.

- [17] Čištění plynů. RICHTER, Miroslav a Otakar SÖHNEL. *Průmyslové technologie III: stroje a zařízení chemického průmyslu : [procesy, stroje a zařízení]* [online]. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, 1999 [cit. 2022-05-5]. ISBN 80-7044-278-6. Dostupné z: http://fzp.ujep.cz/ktv/uc_texty/pt3/13%20CisteniPlynu.pdf
- [18] ŠIMÁNEK, Jiří. *Čištění plynu I: Chlazení a odlučování prachu*. 2. přepr.vyd. Praha: VŠCHT, 1987. ISBN čištění plynu I.
- [19] AFEWORK, Bethel, Jordan HANANIA, Kailyn STENHOUSE a Jason DONEV. Cyclone separator. In: *Energyeducation.ca* [online]. [cit. 2022-05-5]. Dostupné z: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Cyclone_separator
- [20] Module 6: Air Pollutants and Control Techniques - Particulate Matter - Control Techniques. In: *U.S. Environmental Protection Agency* [online]. [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.nrc.gov/docs/ML0917/ML091760654.pdf>
- [21] Spray tower. In: *Wikipedia.org* [online]. [cit. 2022-05-5]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Spray_tower
- [22] VEJVODA, Josef, Pavel MACHAČ a Petr BURYAN. *Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2003. ISBN 80-708-0517-X.
- [23] Electrostatic Precipitator (ESP). In: *Savree.com* [online]. [cit. 2022-05-5]. Dostupné z: <https://savree.com/en/encyclopedia/electrostatic-precipitator-esp>
- [24] Fabric filter. In: *Emis.vito.be* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://emis.vito.be/en/bat/tools-overview/sheets/fabric-filter>
- [25] ŠIMÁNEK, Jiří. *Čištění plynu II*. 2. přepr. a dopl.vyd. Praha: VŠCHT, 1989. ISBN 80-708-0033-X.
- [26] JEŘÁBKOVÁ, Julie. Metody čištění bioplynu na biometan. *Biom.cz* [online]. [cit. 2022-05-05]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/metody-cistení-bioplynu-na-biometan>
- [27] Membrane gas separation. In: *Wikipedia.org* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Membrane_gas_separation
- [28] BAUMGÄRTNER, Max a Thomas SATTELMAYER. Improvement of the turn-down ratio of gas turbines by autothermal on board syngas generation. *Journal of the Global Power and Propulsion Society* [online]. [cit. 2022-05-20]. ISSN 2515-3080. Dostupné z: <https://journal.gpps.global/Improvement-of-the-turn-down-ratio-of-gas-turbines-by-autothermal-on-board-syngas-generation,70868,0,2.html>
- [29] Kogenerační a trigenerační jednotka. In: *Svetenergie.cz* [online]. [cit. 2022-05-5]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/decentralizovana-energetika/decentralizovane-energeticke-zdroje-podrobne/kogeneracni-a-trigeneracni-jednotka/vyklad>
- [30] HORBAJ, Peter a Eva SCHVARZBACHEROVÁ. *Využitie bioplynu v kogenerácii*. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, 2011. ISBN 978-80-553-0577-6.
- [31] KRBEK, Jaroslav a Bohumil POLESNÝ. *Kogenerační jednotky - zřizování a provoz*. Praha: GAS, 2007. GAS. ISBN 978-80-7328-151-9.

- [32] OPLUŠTIL, Josef. Důlní plyn jako druhotný zdroj energie pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla. In: *TZB-info* [online]. [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/kogenerace/5644-dulni-plyn-jako-druhotny-zdroj-energie-pro-kombinovanou-vyrodu-elektriny-a-tepla>
- [33] ŠMERDA, Tomáš, Jiří ČUPERA a Pavel NOVÁK. Provoz traktorového motoru na CNG nebo bioplyn. *Biom.cz* [online]. [cit. 2022-05-05]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: 21. 9. 2011
- [34] Brno si pochvaluje první autobus na biometan z čistírenských kalů, hledá větší zdroj. In: *Zdopravy.cz* [online]. [cit. 2022-05-5]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/brno-si-pochvaluje-prvni-autobus-na-biometan-z-cistirenskych-kalu-hleda-vetsi-zdroj-22897/>
- [35] Autobusy na biometan z čistírny odpadních vod v Brně jezdit nebudou. In: *Zdopravy.cz* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/autobusy-na-biometan-z-cistirny-odpadnich-vod-v-brne-jezdit-nebudou-113727/>
- [36] *Flickr.com* [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/127365515@N04/25332883122>