



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

NÁVRH ČIŠTĚNÍ ODPADNÍCH PLYNŮ

DESIGN FOR WASTE GAS CLEANING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Kubík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Michal Kubík**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Energetické inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

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

Návrh čištění odpadních plynů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Náplň diplomové práce spočívá v popsání základních principů čištění odpadních plynů od plynných, kapalných i tuhých emisí.

Cíle diplomové práce:

- rešerše nečistot obsažených v odpadních i generovaných plynech
- principy zachytu nežádoucích látek v pracích kapalinách
- přehled technologií mokrých vypírek
- návrh trati pro čištění plynu vznikajícího zplyňováním dřevní biomasy
- experimentální ověření navržené trati

Seznam doporučené literatury:

KLASS, Donald L. Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals. San Diego: Academic Press, c1998. ISBN 01-241-0950-0.

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.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problémem nečistot v odpadních a generovaných plynech. Tyto plyny jsou obvykle nízko výhřevné s poměrně vysokými obsahy nejrůznějších nečistot, které jsou hlavním problémem těchto plynných paliv. Po správné úpravě však mohou ve spalovacích zařízeních nahrazovat zemní plyn.

První část práce je rešeršní a teoretická. Základem je stručně charakterizována biomasa a samotný proces zplyňování. Poté jsou popsány nejčastější odpadní plyny – jejich původ a přibližné složení. Další část je věnována jednotlivým typům nečistot, na kterou navazují způsoby jejich odstraňování. Metodou, která může buď současně nebo po určité modifikaci odstraňovat více typů nečistot, je mokrá vypírka, na kterou se proto zaměřuje samostatná kapitola. Existují ale i jiné možnosti čištění, které jsou proto také popsány.

V druhé části je navržena a poté experimentálně ověřena a zhodnocena funkce jednoduché mokré pračky odstraňující dehet z plynu generovaného na experimentálním zařízení Biofluid. Při vypírání se zkoumá účinnost odloučení dehtu v závislosti na teplotě prací vody.

Klíčová slova

biomasa, zplyňování, odpadní plyn, dehet, mokrá pračka

ABSTRACT

This diploma thesis deals with impurities in waste gases and syngas. Those gases usually have low heating value and contain impurities which are the main issue of those gas fuels. Waste gases and syngas can replace natural gas after right gas treatment.

First part is theoretical. It starts with description of biomass and gasification technology. Then the waste gases are described – their origin and usual composition. Next part is dedicated to impurities and is followed by impurities treatment technologies. For removing of almost every type of impurity wet scrubber can be used which is described in detail in following part. There are other types of gas cleaning technologies, so they are described too but not in such detail as wet scrubber.

In second part the wet scrubber is designed, and its function is tested by cleaning syngas from fluidized-bed gasifier called Biofluid. During gas cleaning in wet scrubber the influence of water temperature on efficiency of tar removal is examined.

Key words

Biomass, gasification, waste gas, tar, wet scrubber

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUBÍK, M. *Návrh čištění odpadních plynů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 95 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Návrh čištění odpadních plynů** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu své diplomové práce doc. Ing. Marku Balášovi, Ph.D. za odborné rady týkající se rešeršní, výpočetní i experimentální části, za připomínky k práci a také za přípravu a vedení experimentů. Rád bych také poděkoval Ing. Martinovi Lisému, Ph.D. a Ing. Pavlovi Milčákovi, kteří se také podíleli na měřeních v laboratořích Energetického ústavu. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během celého studia.

Obsah

ÚVOD.....	13
1 Biomasa	14
1.1 Dělení biomasy	14
1.2 Výhody a nevýhody biomasy	15
1.3 Technologie zpracování biomasy	16
2 Zplyňování.....	17
2.1 Procesy zplyňování	18
2.1.1 Sušení	19
2.1.2 Pyrolýza.....	19
2.1.3 Oxidace.....	19
2.1.4 Redukce	20
2.2 Druhy zplyňovacích reaktorů.....	20
3 Energetické plyny	22
3.1 Vysokopecní plyn	22
3.2 Svítiplyn.....	22
3.3 Koksárenský plyn	23
3.4 Důlní plyn	23
3.5 Bioplyn.....	24
4 Nečistoty v plynu.....	25
4.1 Tuhé znečišťující látky	25
4.2 Dehet.....	25
4.3 Sloučeniny dusíku.....	27
4.4 Sloučeniny síry	27
4.5 Sloučeniny chloru	27
4.6 Křemík	28
5 Mokrý pračka.....	29
5.1 Principy odstraňování nečistot.....	29
5.1.1 Srážky nečistot s kapkami kapaliny	29
5.1.2 Kondenzace plynných látek	30
5.1.3 Chemická reakce	30
5.2 Prací kapaliny	30
5.2.1 Voda	31
5.2.2 Kyselina sírová.....	31
5.2.3 Vápencová suspenze	31

5.2.4	Alkalické sloučeniny	32
5.2.5	Organická kapalina	32
5.3	Zařízení pro mokrou vypírku	33
5.3.1	Sprchová věž.....	33
5.3.2	Pěnový (patrový) odlučovač	33
5.3.3	Venturiho pračka	34
5.3.4	Ejektorová pračka	35
5.3.5	Hladinový odlučovač	35
6	Způsoby odstraňování nečistot.....	36
6.1	Odstraňování TZL	36
6.1.1	Cyklonové odlučovače.....	36
6.1.2	Bariérové filtry.....	37
6.1.3	Elektrostatické odlučovače	37
6.1.4	Mokré odlučovače	38
6.2	Odstraňování dehtu.....	38
6.2.1	Primární metody odstraňování dehtu.....	38
6.2.2	Sekundární metody odstraňování dehtu.....	39
6.3	Odstraňování síry	40
6.3.1	Spalování paliva s příměsí sorbentu	40
6.3.2	Mokrý vápencová vypírka	41
6.3.3	Polosuchá metoda odsiřování	42
7	Experimentální část.....	44
7.1	Popis experimentu	44
7.2	Použité metody měření	44
7.2.1	Odběrová trať dehtu.....	44
7.2.2	Jednorázové odběry plynu	46
7.3	Zplyňovací zařízení Biofluid.....	48
7.4	Návrh čistící trati	49
7.5	Výpočtová část	49
7.5.1	Výpočet délky potrubí	50
7.5.2	Výpočet změny teploty prací kapaliny	60
7.5.3	Úpravy trati před měřením kvůli výpočtové části	68
7.6	Průběh experimentální části	68
8	Výsledky experimentální části	71

8.1	Jednorázové odběry	71
8.2	Vzorky dehtu.....	71
8.2.1	Složení dehtu při teplotě vody 2 °C	73
8.2.2	Složení dehtu při teplotě vody 20 °C	75
8.2.3	Složení dehtu při teplotě vody 40 °C	79
8.3	Účinnost odstranění dehtu v závislosti na teplotě prací kapaliny	81
ZÁVĚR.....		83
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....		85
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....		90
SEZNAM OBRÁZKŮ		93
SEZNAM TABULEK		94
SEZNAM PŘÍLOH		95

ÚVOD

V současné době můžeme sledovat nárůst v minulosti méně obvyklých zdrojů energie, který má dva hlavní důvody. Prvním důvodem je snižování zásob fosilních paliv (uhlí, ropa a zemní plyn) a tím jejich rostoucí cena. Druhým důvodem je snaha jednotlivých států o větší využití obnovitelných zdrojů energie (OZE).

Nejznámějšími obnovitelnými zdroji jsou bezpochyby sluneční, větrná a vodní energie. Problémem elektráren využívající tyto zdroje energie je však jejich nestálost. Při slabém nebo naopak velmi silném větru je výkon větrné elektrárny nulový, sluneční elektrárny generují výkon samozřejmě jen přes den, navíc i v průběhu dne může jejich výkon výrazně kolísat v důsledku vlivu počasí. Provoz vodní elektrárny je také výrazně ovlivněn počasím (sucho, záplavy, mráz). Protože lidé, alespoň v současné době, nejsou schopni s dostatečnou účinností a ve větším množství ukládat elektrickou energii, způsobuje tato nestálost problémy. V případě snížení výkonu z elektráren OZE je nutno celý tento deficit v síti okamžitě nahradit jinými zdroji energie, které obvykle opět spalují palivo a tím řekněme snižují čistotu energie. Z tohoto hlediska je vhodný další obnovitelný zdroj energie – biomasa.

Potenciál využívání biomasy jako OZE v ČR ještě navyšuje fakt, že více než 50 % rozlohy ČR je využíváno pro zemědělské účely (orná půda, sady a zahrady, vinice, chmelnice, louky a pastviny) a dalších 33 % rozlohy je lesní půdou. Primárně je biomasa ze zemědělské půdy určena pro potravinářský či jiné průmysly, avšak minimálně její odpadní část může být vhodná i pro energetický průmysl. Lesní půda je samozřejmě zdrojem kvalitnější dřevní biomasy. V součtu je tak 87 % rozlohy ČR využíváno k cílenému pěstování či přirozenému růstu biomasy [1].

Způsobů zpracování biomasy pro energetické účely je samozřejmě více a budou zmíněny v následujících kapitolách. V této práci nás však bude zajímat zplyňování biomasy, což je termochemická přeměna pevného paliva za nedostatečného množství kyslíčového plynu na výhřevný plyn, jehož hlavními hořlavými složkami jsou vodík, oxid uhelnatý a metan. Obsahuje však také nečistoty jako tuhé znečišťující látky, dehet, sloučeniny síry, dusíku a chloru. Dehet je největším problémem zplyňování, protože při nižších teplotách kondenzuje a společně s tuhými částicemi zanáší samotné zplyňovací zařízení, potrubí, kterým je dopravován, a také koncové zařízení kde je plyn zpracováván. Tento plyn je označován jako generovaný plyn a může být využíván jako levnější náhrada zemního plynu.

Generovaným plynům se svými vlastnostmi podobají odpadní plyny – mají podobnou výhřevnost a také obsahují nečistoty, které je před zpracováním nutno odstranit. Typickým příkladem odpadního plynu může být vysokopecní plyn, který je vedlejším produktem při získávání železa ze železné rudy ve vysoké peci. Protože jsou odpadní plyny sekundárními produkty, obvykle nemají jiné využití než právě pro jejich spalování a výrobu elektrické či tepelné energie.

Hlavním cílem této diplomové práce tak bude popsat problematiku nečistot v odpadních a generovaných plynech. Tedy popsat jednotlivé typy nečistot a zejména způsoby jejich odstraňování s tím, že v závěrečné části dojde k experimentálnímu ověření funkce jednoduché mokré pračky.

1 Biomasa

Biomasa je hmota rostlinného či živočišného původu. Zahrnuje jak samotné rostliny a živočichy, tak jejich produkty jako jsou semena, obaly, exkrementy apod. Základním a pro energetiku nejdůležitějším producentem biomasy jsou rostliny, které pro svůj růst využívají fotosyntézu.

Fotosyntéza je biochemický proces, který přeměňuje sluneční energii na energii chemických vazeb a zajišťuje přeměnu jednoduchých látek, jako je oxid uhličitý a voda, na energeticky bohaté organické sloučeniny, které slouží jako stavební látky rostlin a umožňují tak jejich růst. Biomasa tedy funguje jako zásobárna energie, protože zachycuje sluneční energii, kterou při následném termickém zpracování biomasy získáváme. Problémem je velice nízká účinnost přeměny, která ani za nejlepších podmínek nepřekročí 3 %. To znamená, že biomasa je schopna přeměnit méně než 3 % sluneční energie, která na ni dopadá [2].

1.1 Dělení biomasy

Biomasa se z energetického hlediska dle původu dělí na [3][4]:

- cíleně pěstovanou biomasu
 - energetické (rychlerostoucí) dřeviny – využívané primárně v energetice
 - topol, vrba, olše, javor, akát a další
 - obiloviny
 - olejnaté plodiny
 - řepka olejná, slunečnice, len a podobné rostliny sloužící pro výrobu olejů
 - škrobo-cukernaté plodiny
 - brambory, cukrová řepa, kukuřice a další rostliny pěstované pro využití v potravinářském průmyslu
- odpadní biomasu
 - rostlinné odpady ze zemědělské výroby
 - řepková, kukuřičná nebo obilná sláma, odpady ze sadů, vinic apod.
 - rostlinné odpady z údržby krajiny
 - odpady z údržby zeleně a travnatých ploch a zbytky po likvidaci křovin
 - lesní odpady
 - odpady po těžbě dřeva jako pařezy, kořeny a vršky stromů
 - křoviny a nevyužitelné dřeviny (například stromy napadené škůdci nebo znehodnocené požáry či přírodními katastrofami)
 - biomasové odpady z průmyslových výrob
 - piliny, hobliny či kůra z provozů dřevařského průmyslu
 - odpady z cukrovarů a lihovarů

Dle obsahu vody dělíme biomasu na [4]:

- suchou
 - dřevo, sláma a jiné suché zbytky z pěstování zemědělských plodin, lesnictví a průmyslu
 - přestože je označována jako suchá, obsahuje menší množství vody a je potřeba ji v některých případech vysušovat
- mokrou
 - tekuté živočišné odpady jako je kejda a hnůj
 - tekuté komunální odpady
 - nevhodná pro termické zpracování, využití například v bioplynových stanicích
- speciální
 - olejnin, škrobové a cukernaté plodiny
 - v energetice využitelné pro výrobu bionafty a lihu

Využití biomasy je velice ovlivněno obsahem vody v biomase. Pro termochemické procesy je používána biomasa s nižším obsahem vody.

1.2 Výhody a nevýhody biomasy

Energetické využití biomasy má, stejně jako jiné typy paliv, své klady a zápory [3].

Výhody

- patří mezi obnovitelné zdroje energie
- nízký obsah síry
- může být i odpadní látkou (nízká cena odpadní biomasy a zároveň snížení objemu odpadů)
- nízká cena, velká dostupnost a rozšířenost zařízení pro spalování biomasy
- způsob využití půdy, která není vhodná pro zemědělskou produkci

Nevýhody

- větší objem paliva na jednotku výkonu (větší nároky na skladování a dopravu)
- složitá manipulace s palivem a jeho biologická degradace
- nutnost úpravy paliva (od řezání přes čištění, sušení a štěpkování až po lisování do pelet nebo briket) a s tím související nutnost pořízení zařízení pro dané zpracování biomasy
- velikost spalovacího nebo zplyňovacího zařízení je omezena dostupností biomasy v okolí (ekonomicky výhodné je do zařízení dovážet jen biomasu z okruhu maximálně 30 km od zařízení)

1.3 Technologie zpracování biomasy

Existuje velké množství způsobů zpracování biomasy, které se od sebe vzájemně výrazně liší a pro každý způsob je vhodnější jiný typ biomasy.

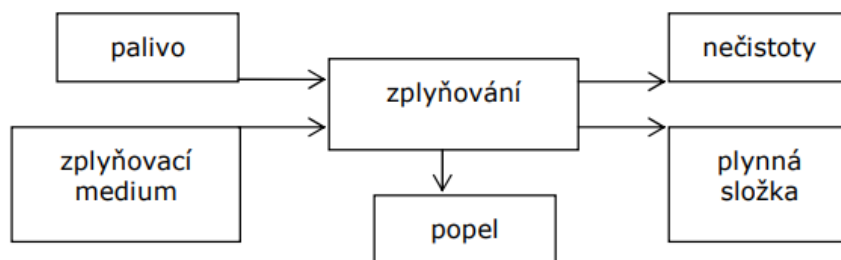
Způsoby zpracování biomasy

- termochemická konverze
 - spalování
 - zplyňování
 - pyrolýza
- biochemická konverze
 - anaerobní fermentace
 - aerobní fermentace
- fyzikálně-chemická konverze
 - esterifikace bioolejů
 - mechanická konverze
 - štípání, drcení, briketování, peletování a další mechanická zpracování, jejichž úkolem je zpracování surové biomasy
 - nedochází k získávání energie

2 Zplyňování

Tato diplomová práce se zabývá čištěním generátorových a odpadních plynů. Generátorový plyn je plynný produkt procesu zplyňování.

Zplyňování je termochemická přeměna pevného uhlíkatého materiálu na výhřevný generátorový plyn. Probíhá za nedostatku zplyňovacího média při vysokých teplotách. Zplyňovacím médiem může být například vzduch, kyslík, vodní pára nebo jejich směsi. Nejčastěji se pro svou dostupnost používá vzduch, při použití kvalitnějšího zplyňovacího média však dochází k výraznému nárůstu výhřevnosti plynu [5].



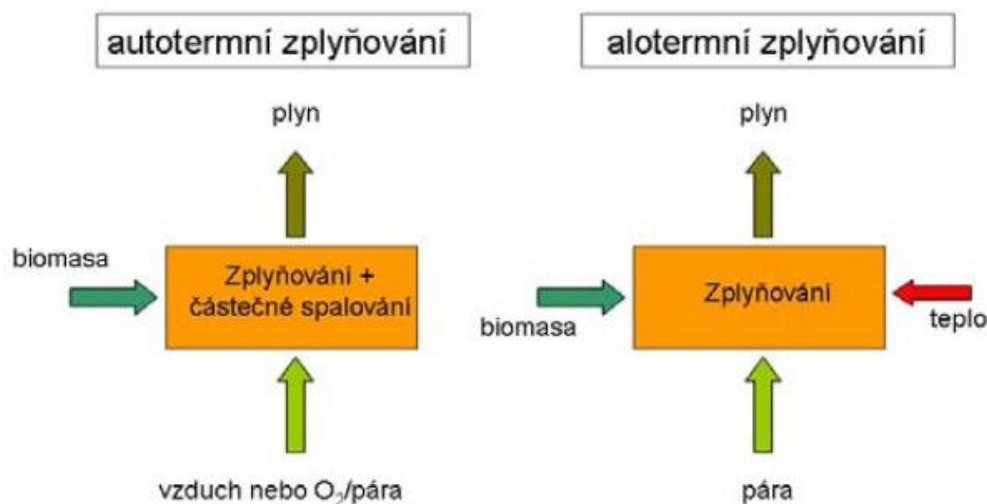
Obr. 2.1 Schéma zplyňování [54]

Generátorový plyn je směsí plynných, pevných i kapalných látek. Skládá se z [6][19]:

- výhřevných (žádoucích) složek
 - H_2 , CO , CH_4 a další organické složky
 - zvyšují výhřevnost plynu a nezpůsobují žádné provozní problémy
- doprovodných složek
 - CO_2 , H_2O , N_2
 - změna výhřevnosti a provozní problémy jsou minimální nebo zanedbatelné
- znečišťující složky
 - dehet, pevné prachové částice, sloučeniny síry nebo chloru, alkalické sloučeniny a další
 - způsobují provozní problémy a ve většině případu je nutné je z plynu odstraňovat

Jak již bylo zmíněno výše, velký vliv na výhřevnost generovaného plynu má zplyňovací médium. Nejběžněji je využíván vzduch, který obsahuje potřebný kyslík. Vzduch však obsahuje také velký podíl dusíku, který se tak dostává do generovaného plynu. Výsledkem je plyn s vysokým obsahem dusíku (obvykle okolo 50 %) a nízkou výhřevností pohybující se v rozmezí $2,5\text{--}8\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$. Obsah dusíku v generovaném plynu se dá zredukovat téměř na nulu použitím jiného zplyňovacího média. Vhodnou volbou může být zplyňování s využitím čistého kyslíku, výsledkem tak bude plyn bez dusíku s vysokou výhřevností. Samozřejmě se ale výrazně navýší provozní náklady zplyňovacího zařízení. Při využití vzduchu nebo kyslíku dochází ke spálení části paliva (uvádí se přibližně 20 až 25 % hmotnosti paliva), což dodává dostatečnou energii ostatním zplyňovacím procesům. Tento způsob zplyňování se nazývá autotermní (přímé) [7].

Druhým způsobem je alotermní (nepřímé) zplyňování, při kterém je jako zplyňovací médium používána například vodní pára. Produktem je plyn s vysokým obsahem vodíku a vyšší výhřevností.



Obr. 2.2 Schéma autotermního a alotermního zplyňování [68]

Při tomto způsobu zplyňování však nedochází k dostatečnému spalování paliva, a proto musí být teplo do reaktoru dodáváno z vnějšího zdroje. Tab. 2.1 ukazuje rozdíly ve výhřevnosti a složení generovaného plynu při využití různých zplyňovacích médií [7].

Tab. 2.1 Porovnání složení a výhřevnosti generovaného plynu při použití různých zplyňovacích médií [7]

Zplyňovací médium		Vzduch	Parokyslíková směs	Vodní pára
Způsob zplyňování		autotermní	autotermní	alotermní
Výhřevnost	[MJ·m ⁻³]	4–6	12–15	12–14
H ₂	[%]	11–16	25–30	35–40
CO	[%]	13–18	30–35	25–30
CO ₂	[%]	12–16	23–28	20–25
CH ₄	[%]	3–6	8–10	9–11
N ₂	[%]	45–60	<1	<1

2.1 Procesy zplyňování

Zplyňování je složitý proces, který se skládá ze čtyř základních dějů, které mohou probíhat v různých oblastech (zplyňovací reaktor s pevným ložem) nebo mohou probíhat všechny současně v celém reaktoru (zplyňovací reaktor s fluidním ložem). Přesná poloha těchto oblastí závisí na typu a konstrukci zplyňovacího zařízení a podmínkách zplyňování v daném časovém okamžiku. Základní děje probíhající při zplyňování jsou [6][8]:

- sušení
- pyrolýza
- oxidace
- redukce

2.1.1 Sušení

Sušení ve zplyňovacím zařízení probíhá při teplotě do 200 °C, což je dostatečná teplota pro odstranění přebytečné vody z paliva a zároveň teplota, při které ještě nedochází ke spalování nebo k jiným, v sušící zóně nežádoucím procesům. Maximální vlhkost paliva ke zplyňování je do 20 %, při vyšší vlhkosti je obvykle nutné palivo vstupující do zplyňovacího zařízení předsušit v externím zařízení. Voda uvolněná při sušení může reagovat v dalších procesech probíhající při zplyňování nebo může odcházet jako součást generovaného plynu.

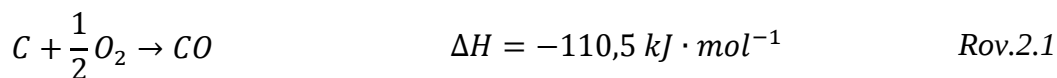
2.1.2 Pyrolýza

Během procesu pyrolýzy dochází ve zplyňovacím reaktoru k rozkladu paliva bez přístupu oxidačního média (okysličovadla). Palivo se ohřívá a odpařuje se z něj voda, která v něm zbyla po sušení. Při teplotách přesahujících 300 °C dochází k uvolnění hořlavých plynných látek z paliva. K jejich hoření však kvůli nedostatku okysličovadla nedochází a tvoří tedy základ generovaného plynu. V generátoru tak zůstává odplyněné palivo, které je složeno z 80–85 % tuhým uhlíkem, 15–20 % prchavými látkami a malého množství popele (obvykle do 2 %). Toto odplyněné palivo je dále využito v pásmu oxidace.

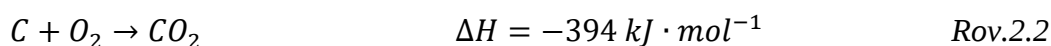
2.1.3 Oxidace

Oblast oxidace se nachází v oblasti přívodu zplyňovacího média. Jako jediný proces ze zplyňování je exotermický (produkuje teplo) a je tak jediným zdrojem tepla, které dodává pro ostatní procesy. V některých případech může být množství tohoto tepla nedostačující, a proto musí být teplo dodáváno z externího zdroje. Dochází zde ke spalování pevného uhlíkatého paliva a také části hořlavých plynných látek vzniklých při pyrolýze. V produktech pyrolýzy, které prochází oxidační zónou, dochází k výraznému snížení obsahu dehtu. Teploty v této zóně dosahují 800–1500 °C.

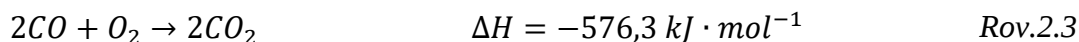
Částečná oxidace pevného uhlíku



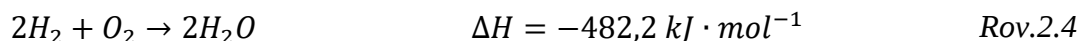
Oxidace pevného uhlíku



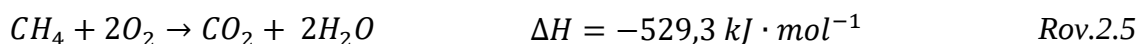
Oxidace oxidu uhelnatého



Oxidace vodíku



Oxidace metanu



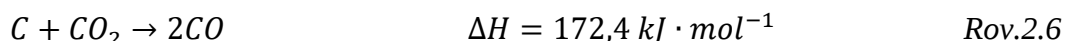
Hodnoty tepla ΔH platí pro standartní podmínky $T_0 = 298,15 \text{ K}$ a $p_0 = 101,325 \text{ kPa}$. Pro endotermické reakce jsou hodnoty ΔH kladné, pro exotermické záporné. Stejně podmínky platí i pro následující reakce v redukční zóně [6].

2.1.4 Redukce

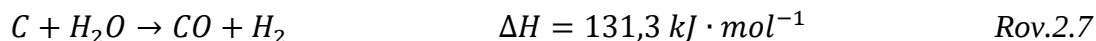
V redukční zóně dochází k redukci látek, které vznikly v předchozích procesech. Jedná se především o oxid uhličitý, který se redukuje na výhřevný (spalitelný) oxid uhelnatý, a vodu, která se redukuje na vodík. Oxid uhelnatý a vodík navíc mohou reagovat mezi sebou a vytvářet tak metan. Všechny tyto reakce jsou vysoce žádoucí a zvyšují celkovou výhřevnost generovaného plynu. Také jsou vysoce endotermní a spotřebovávají značné množství energie dodávané z oxidačních reakcí. Teplota v redukční zóně se pohybuje v rozmezí 800–1000 °C. Dochází k heterogenním a homogenním reakcím.

Heterogenní reakce

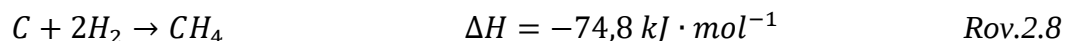
Boudouardova reakce



Heterogenní reakce vzniku vodního plynu

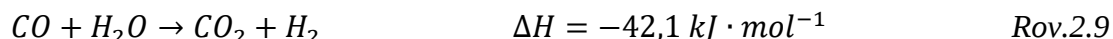


Heterogenní vznik metanu

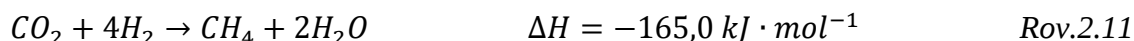
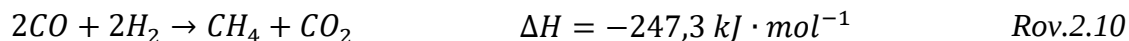


Homogenní reakce

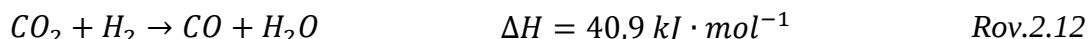
Homogenní reakce vodního plynu



Homogenní vznik metanu



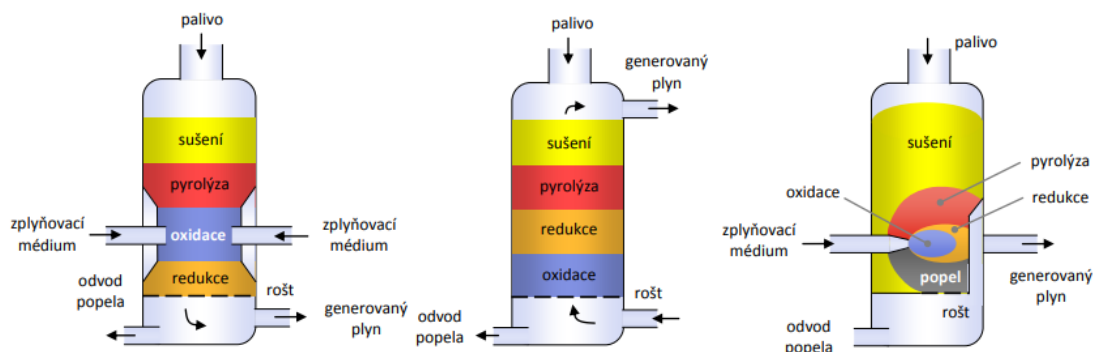
Homogenní redukce oxidu uhličitého



2.2 Druhy zplyňovacích reaktorů

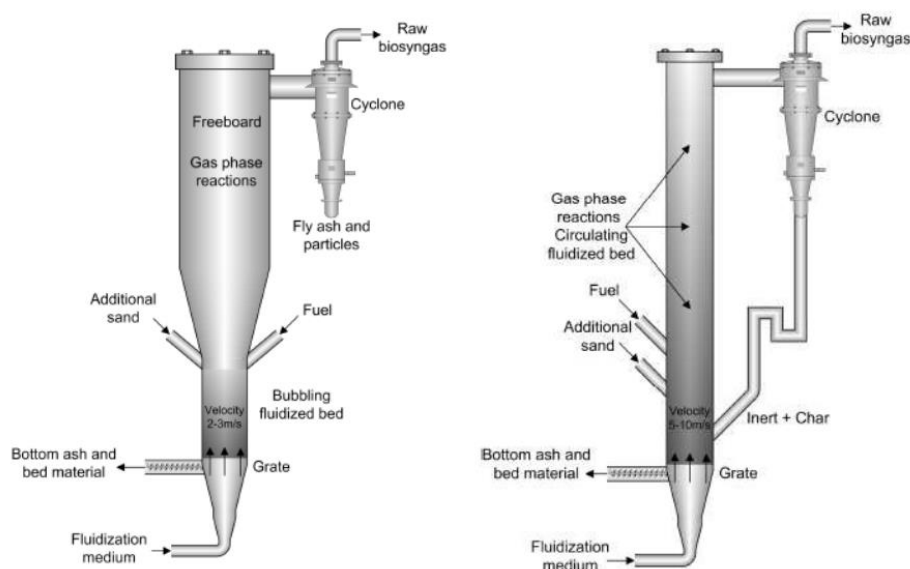
V historii zplyňování bylo navrženo a zkonstruováno mnoho zplyňovacích zařízení. Jejich konstrukce a princip může být velice odlišný nebo se naopak mohou lišit jen v poměrně malých detailech. Zplyňovací zařízení se dle konstrukce dělí do dvou základních skupin [7][19]:

- s pevným ložem
 - souproudé
 - protiproudé
 - s křížovým tokem



Obr. 2.3 Zplyňovací reaktory s pevným ložem – zleva: souproudý, protiproudý, s křížovým tokem [9]

- s fluidní vrstvou
 - se stacionární (bublající) fluidní vrstvou
 - s cirkulující fluidní vrstvou



Obr. 2.4 Zplyňovací reaktory s fluidní vrstvou – zleva: se stacionární fluidní vrstvou, s cirkulující fluidní vrstvou [10]

Problematika druhů zplyňovacích reaktorů je poměrně rozsáhlá a překračuje rámec této diplomové práce. Navíc již byla popsána v bakalářské práci na téma Zplyňování Biomasy [11].

3 Energetické plyny

Energetické plyny jsou většinou sekundárními produkty procesů v různých průmyslových odvětvích. Jedná se o směs plyných, pevných i kapalných látek. Svými vlastnostmi se podobají generovaným plynům – nižší výhřevnost, vyšší obsah nečistot.

Plynné složky se dělí na hořlavé látky a balast. Balastem jsou označovány látky v plynu, které nezvyšují výhřevnost. Jedná se zejména o N_2 , CO_2 a O_2 .

U každého z uvedených energetických plynů je v tabulkách uvedeno jeho složení. Nicméně, vysokopecní plyn z jednoho provozu se svým složením může poměrně výrazně lišit od vysokopecního plynu z jiného provozu. Proto je nutné brát tabulky s rezervou zejména jako ukazatel majoritních složek.

3.1 Vysokopecní plyn

Vysokopecní nebo také kychtový plyn vzniká jako sekundární produkt při získávání surového železa ze železné rudy ve vysokých pecích [12].

Typické složení a výhřevnost

Ve vysoké peci je jako oxidační činidlo používán vzduch. Proto výsledný plyn obsahuje i více než 60 % dusíku. Dalších přibližně 25 % tvoří oxid uhelnatý, 10–20 % oxid uhličitý a do 5 % vodík. Oxidy uhlíku se do plynu dostávají ze spalování koksu (dokonalého či nedokonalého) a z redukce železné rudy, která ve vysoké peci reaguje s uhlíkem nebo oxidem uhelnatým [13].

Tab. 3.1 Složení vysokopecního plynu [14]

Hořlavé složky				Balast			Výhřevnost
CO	H ₂	CH ₄	C _x H _y	N ₂	CO ₂	O ₂	
[%]							[MJ·m ⁻³]
26	2	0,4	-	59,6	12	-	3,66

Kromě těchto základních složek obsahuje také poměrně velké množství sloučenin síry, které se do plynu dostávají z uhlí a velké množství tuhých znečišťujících látek [12].

Další informace

Vysokopecní plyn dosahuje velmi nízké výhřevnosti, obvykle do 4 MJ·m⁻³. V praxi se obohacuje koksárenským nebo zemním plynem (mají mnohem vyšší výhřevnost) a tento směsný plyn je poté využíván v hutích nebo k technologickým účelům [12].

3.2 Svítiplyn

Svítiplyn je plynné palivo, které se vyrábí zplyňováním hnědého uhlí nebo také vzniká jako vedlejší produkt v koksárnách. Při hoření vydává jasný plamen, proto se už od počátku 19. století využíval jako palivo do plynových lamp. Velkovýroba svítiplynu byla v České republice definitivně ukončena v roce 1996, kdy byla celá plynárenská síť převedena na vhodnější zemní plyn [12].

Typické složení a výhřevnost

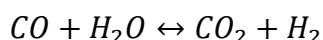
Svítiplyn se získává převážně tlakovým zplyňováním hnědého uhlí kyslíkem a vodní parou. Výsledkem je tak plyn, který může být až z 60 % složen z vodíku. Dále je ve svítiplynu obvykle okolo 25 % metanu a 5–10 % oxidu uhelnatého [12].

Tab. 3.2 Složení svítiplynu [14]

Hořlavé složky				Balast			Výhřevnost
CO	H ₂	CH ₄	C _x H _y	N ₂	CO ₂	O ₂	
[%]							[MJ·m ⁻³]
10	47	22,4	1,6	14,3	4,2	0,5	15,7

Další informace

Výhřevnost svítiplynu se dle přesného složení pohybuje okolo 15 MJ·m⁻³. Surový svítiplyn může obsahovat až 10 % oxidu uhelnatého. Ten je sice významnou výhřevnou složkou svítiplynu, jeho obsah se ale v dobách využívání svítiplynu snižoval na hranici 5 %, protože při úniku svítiplynu docházelo k otravě oxidem uhelnatým. Snižování obsahu oxidu uhelnatého se provádělo katalytickou konverzí s vodní parou.



Rov.3.1

Docházelo tak ke snižování obsahu výhřevného oxidu uhelnatého a současněmu navyšování obsahu nevyužitelného oxidu uhličitého, díky čemuž docházelo k celkovému snížení výhřevnosti svítiplynu. To se kompenzovalo tak, že se do svítiplynu v případě potřeby přidával metan nebo propan-butan [12].

3.3 Koksárenský plyn

Koksárenský plyn je vedlejším produktem při přeměně uhlí na koks v koksárnách. To je proces, který probíhá za vysokých teplot a za nedostatku kyslíku. Uhlí se ohřívá na teplotu 900–1400 °C a díky tomu se z něj uvolňují těkavé složky, které jsou základem koksárenského plynu [12][15].

Typické složení a výhřevnost

Složení koksárenského plynu je velice podobné svítiplynu, což je způsobeno podobným procesem výroby [15].

Tab. 3.3 Složení koksárenského plynu [14]

Hořlavé složky				Balast			Výhřevnost
CO	H ₂	CH ₄	C _x H _y	N ₂	CO ₂	O ₂	
[%]							[MJ·m ⁻³]
6,6	47,9	23,1	2,4	16,4	3,4	0,1	16,13

3.4 Důlní plyn

Důlní plyn je přírodní plyn, který doprovází uhelná ložiska. Vzniká z původně biologické hmoty během geologických procesů při jejím zuhelnování. Při těžbě uhelných ložisek pak dochází k uvolňování důlního plynu jak do vytěžených prostor, tak do atmosféry [12][16].

Typické složení a výhřevnost

Složení důlního plynu závisí na mnoha geologických podmínkách, ale také na tom, jak dlouho je již uhelné ložisko otevřeno. Důlní plyn na počátku těžby při otevření ložiska obsahuje přibližně 90 % metanu, 3 % vyšších uhlovodíků a 7 % balastu, díky čemuž má velmi vysokou výhřevnost. Oproti tomu důlní plyn, který získáváme odvětráváním ukončených uhelných dolů obsahuje do 60 % metanu a nazýváme jej degazační. Jeho výhřevnost je přibližně v rozmezí 11–20 MJ·m⁻³ [12][16].

Další informace

Důlní plyn je zajímavý zejména z toho důvodu, že se vyskytuje přirozeně. To znamená, že není vyráběn v žádném průmyslovém procesu, ale pouze se odsává z přirozeně vytvořených uhelných ložisek. To je na jednu stranu výhodou, protože jediné, co potřebujeme, je zařízení pro jeho odsávání. S tím ale na druhou stranu souvisí jeho určitá vzácnost a tím i omezená produkce [16].

3.5 Bioplyn

Bioplyn je produktem anaerobní fermentace, což je biologický rozklad organické hmoty probíhající za nepřístupu vzduchu. Probíhá jak v přírodě (bažiny, dna jezer) nebo uměle (sklárky, fermentory k tomuto účelu určené) [12][17].

Typické složení a výhřevnost

Složení bioplynu je silně závislé zejména na fermentovaném materiálu. Bioplyn je z hlavní části složen z metanu a z menší části z oxidu uhličitého. Jiné látky se vyskytují jen minimálně. Dle původu dělíme bioplyn na tři základní typy – skládkový, bioplyn z čističky odpadních vod (ČOV) a bioplyn z bioplynových stanic. Nejvyšší je bioplyn z bioplynových stanic, který může obsahovat až 70 % metanu. Příklad složení jednotlivých bioplynů znázorňuje tab. 3.4, ve které je původním materiálem pro výrobu bioplynu v bioplynové stanici prasečí kejda [17].

Tab. 3.4 Složení bioplynů [14]

Původ bioplynu	Hořlavé složky			Balast		Výhřevnost
	CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	O ₂	
	[%]					[MJ·m ⁻³]
Skládkový plyn	1	1	49	46	3	16,9
ČOV	-	1	61	38	-	21,1
Bioplynová stanice	-	-	69	31	-	24

4 Nečistoty v plynu

Největším problémem a také důvodem, proč není zplyňování rozšířenější technologií energetického zpracování (nejen) biomasy, jsou nečistoty obsažené v generovaném plynu. Tyto nečistoty mohou být tuhé, plynné i kapalné látky, které způsobují různé provozní problémy jako koroze, zanášení přívodních cest a zalepování pracovních a teplosměnných ploch při následném zpracování energoplynu [18][19].

4.1 Tuhé znečišťující látky

Tuhé znečišťující látky (TZL) jsou pevné částice obsažené v plynu při výstupu ze zplyňovacího zařízení. Společně s dehtem zanášejí potrubí a zejména při vyšších rychlostech proudění způsobují abrazi. TZL ve generovaném plynu pocházejí z několika zdrojů. Prvním zdrojem je popelovina, což je anorganická nespálitelná část paliva (u dřeva jen asi 1 % hmotnosti, u uhlí 5–20 % v závislosti na kvalitě), dalšími zdroji jsou nedokonale odplyněné částice paliva (polokoks), saze a v případě fluidního zplyňovacího reaktoru také inertní materiál lože (písek, keramika) [21].

Množství TZL v generovaném plynu závisí na obsahu popelovin v palivu a také na konstrukci reaktoru. Nečistoty obsažené v palivu nebo dodané s palivem (zemina, písek a kamení) mohou být dalším zdrojem TZL [20].

Z odpadních plynů má vysoký obsah TZL zejména vysokopecní plyn, který obsahuje pevné částice ze vsázky [12].

4.2 Dehet

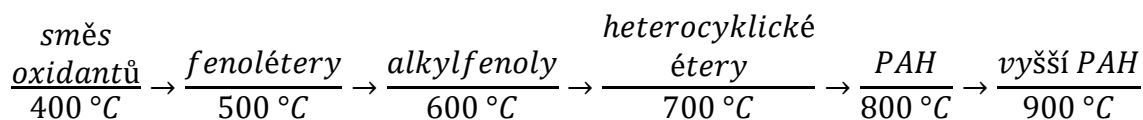
Dehet je skupina látek s nejrůznější strukturou a chemickou povahou, definovaných jako suma organických látek s bodem varu vyšším než benzen (80,1 °C). Vzniká jako vedlejší produkt během pyrolýzy paliva. Množství a složení dehtu v plynu závisí na použitém palivu, typu zplyňovacího zařízení, zplyňovací teplotě, rychlosti ohřevu, doby zdržení v reaktoru a mnoha dalších faktorech [22][23].

Dehet se v odpadních nebo generovaných plynech vyskytuje ve formě par nebo jako perzistentní aerosol. Má ale tendenci kondenzovat na chladnějších površích zařízení a spolu s pevnými nečistotami vytvářet nánosy, které ucpávají potrubí nebo jiné pracovní části zařízení. Počátek kondenzace závisí na obsahu dehtu v plynu a také na jeho složení [24].

Složení a tvorba dehtu

Po vstupu biomasy do reaktoru dochází postupně k vysoušení, uvolňování prchavé složky a tepelnému rozkladu paliva. Prchavá složka se může rozkládat na permanentní plyny nebo může podléhat dehydratačním, kondenzačním a polymerizačním reakcím, které vedou ke vzniku dehtu [22].

Velký vliv na složení dehtu má teplota v reaktoru. Obr. 4.1 znázorňuje, jaké typy dehtu se budou vytvářet v závislosti na teplotě.



Obr. 4.1 Transformace dehtu v závislosti na teplotě [23]

Dělení dehtu

Díky velkému množství látek, které souhrnně označujeme jako dehet, rozdělujeme složky dehtu do skupin, kde každá skupina obsahuje látky s podobnými chemickými a fyzikálními vlastnostmi. Proto dehet rozdělujeme do následujících skupin [23]:

- primární
 - řádově stovky zástupců
 - sloučeniny odvozené od celulózy, hemicelulózy a ligninu
- sekundární
 - fenoly a alkeny
- alkylové terciální produkty
 - metylnaftalen, toluen, inden, ...
- kondenzované terciální produkty
 - označované také jako polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH)
 - antracen, pyren, fenanthren, fluoranten, ...

PAH jsou skupinou více než sta látek, které jsou tvořeny uhlíkem a vodíkem ve formě benzenových jader. Vznikají jako vedlejší produkty při každém spalovacím procesu. Většina PAH jsou karcinogenní látky, které také způsobují vývojové či reprodukční poruchy. Při nedokonalém spalování množství vzniklých PAH narůstá [22].

Primární dehet vzniká v průběhu pyrolýzy, kdy se z celulózy a ligninu obsažených v biomase vytváří aldehydy, alkoholy, furany apod. Ve fázi oxidace dochází ke zvýšení teploty nad 500 °C a ke vzniku fenolů a alkenů, které jsou označovány jako sekundární dehet. Dalším zvýšením teploty nad přibližně 800 °C dochází ke vzniku terciálního dehtu, který vzniká rozkladem sekundárního dehtu v redukčním prostředí syntézního plynu [25][26].

Obsah dehtu se obvykle stanovuje pomocí chromatografického rozboru. Touto metodou jsme schopni určit asi 80 % dehtů. Jednotlivé složky dehtu se poté třídí dle molekulové hmotnosti a chemického složení do skupin. Toto rozdělení je podobné rozdělení na primární, sekundární a terciální dehet, je však o něco podrobnější [27][28].

- dehty nezjistitelné chromatografickým rozbohem
 - nejtěžší dehty s vysokou molární hmotností (větší než 350 g·mol⁻¹)
- heterocyklické aromáty
 - fenol, pyridin, kresol
 - vysoká rozpustnost ve vodě
- lehké aromatické uhlovodíky
 - benzen, toluen, xylen, styren
 - nízký rosný bod – zůstávají v plynné formě
 - vysoká rozpustnost ve vodě
- lehké polyaromatické uhlovodíky
 - naftalen, methylnaftalen, bifenyl
 - obsahují 2 až 3 benzenová jádra
 - při nízkých koncentracích v plynné formě, při vyšších teplotách dochází k usazování
- těžké polyaromatické uhlovodíky
 - fluoranthen, pyren

- více než 3 benzenová jádra
- kondenzují i při nízkých koncentracích a vysokých teplotách
- zjištěné ale neidentifikovatelné dehtové složky

4.3 Sloučeniny dusíku

Dusíkaté sloučeniny samy o sobě žádné provozní problémy nezpůsobují, ale při jejich spalování vznikají NO_x , které jsou omezeny emisními limity. Společně s SO_x jsou totiž hlavními příčinami kyselých dešťů.

Při použití vzduchu jako zplyňovacího média se dusík v generovaném plynu vyskytuje ve velkém množství jako molekula N_2 . Dusík je ale inertní plyn, takže ve formě N_2 je neškodný, pouze snižuje výhřevnost plynu. Pokud je cílem produkovat vysoce výhřevný generovaný plyn, je nutné použít jiné zplyňovací médium než vzduch, např. čistý kyslík nebo vodní páru.

Problémy ale způsobují sloučeniny dusíku, a to zejména amoniak NH_3 a v menší míře například kyanovodík HCN , při jejichž spalování dochází k uvolňování NO_x . Proto je žádoucí z plynu sloučeniny obsahující sodík odstraňovat. K tomuto účelu není mokrá vypírka příliš vhodným řešením, protože voda v pračce se sloučeninami dusíku postupně nasytí a další sloučeniny již není schopna pojmout. Vhodnějším řešením je použití katalyzátorů, a to buď pro redukci NO_x v plynu nebo ještě před spalováním na rozklad NH_3 [20][21].

4.4 Sloučeniny síry

Síra se oproti dusíku ve vzduchu neobjevuje, takže její množství je závislé na množství síry obsaženém v palivu. Biomasa obecně obsahuje jen malé množství síry, v případě dřeva zastupuje síra maximálně 0,1 % hmotnosti, u stébelnin se může obsah síry dostat k maximálně 0,4 %. Pro porovnání černé uhlí obsahuje přibližně 1 % síry, hnědé uhlí okolo 2 %. Vysoký obsah síry je tedy problémem zejména při zplyňování uhlí a plyny vyrobené zplyňováním biomasy obsahují jen malé množství síry [21].

I přes velmi nízký obsah síry v plynu vyrobeném z biomasy je nutné zajistit její odstranění z plynu. Síra totiž společně s chlorem, fluorem a alkalickými solemi působí korozivně na ocelové konstrukční materiály zařízení pracujících s plynem. Sloučeniny síry jsou také hlavním katalytickým jedem např. Pro niklové katalyzátory, které se využívají jako jedna z možností odstraňování dehtu z plynu. Již při velmi nízkém obsahu sloučenin síry v plynu dochází k adsorpci síry na povrchu niklového katalyzátoru a vytváření sulfidů niklu. To má za následek snížení účinnosti katalyzátorů či jejich úplnou deaktivaci [20][29].

Většina síry je v energoplynu obsažena ve formě sulfanu H_2S . V menším množství se síra může vyskytovat také ve formě sirouhlíku CS_2 a v minimálním množství také ve formě karbonylsulfidu COS a obecně oxidů síry SO_x [29].

4.5 Sloučeniny chloru

Dalším problémem specifickým pro biomasu jsou organické sloučeniny, které mohou být již dříve obsaženy v biomase nebo které mohou vznikat až při spalování biomasy. Jedná se o tzv. persistentní organické polutanty (zkráceně POP). Jsou vysoce toxické, mohou být rakovinotvorné nebo způsobovat vývojové či reprodukční poruchy [21][30][31].

Tyto látky jsou velice nebezpečné zejména z těchto důvodů [30][31]:

- toxicita
 - schopnost látky způsobovat poškození nebo smrt živých organismů
 - jsou rakovinotvorné, způsobují vznik imunologických, reprodukčních nebo vývojových poruch
- persistence
 - schopnost látky zůstat v prostředí po dlouhou dobu beze změny
 - odolnost vůči chemickému, fotochemickému, termickému i biochemickému rozkladu
- bioakumulace
 - zachytávání a hromadění těchto látek v živých organismech z okolního prostředí nebo potravy
- dálkový transport
 - potenciál cestovat od původního zdroje do oblastí vzdálených tisíce kilometrů

4.6 Křemík

Křemík je nutné sledovat zejména u spalovacích motorů, protože negativně působí na kvalitu mazacího oleje. Křemík se v biomase obvykle nachází ve velmi malých koncentracích, proto není měřitelný obvyklými metodami. Stanovuje se jeho kumulativní množství po určité době provozu [32].

5 Mokrý pračka

Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, generovaný nebo odpadní plyn může obsahovat širokou škálu nečistot. Nečistoty se od sebe liší v mnoha ohledech – skupenstvím, obsaženým množstvím, reaktivitou s jinými látkami, u pevných látek velikostí částic atd. Pro každou z nečistot obvykle existuje několik způsobů odstraňování, které ale, až na výjimky, odstraňují jen jeden typ nečistot. Existuje však metoda odstraňování nečistot, která je schopna buď současně nebo po určité modifikaci odstraňovat více typů nečistot a tou je mokrá vypírka.

Přestože mokrá vypírka je schopna odstraňovat také pevné částice, při použití mokré vypírky v praxi bývá plyn před vstupem do pračky očištěn alespoň od nejhrubších prachových částic. Vysoký obsah pevných nečistot totiž snižuje účinnost odloučení dehtu [33].

K odlučování nečistot z plynu využívá vodu nebo jinou kapalinu. Dle vzájemného směru proudění čištěného plynu a vypírací kapaliny dělíme mokré vypírky na [33]:

- protiproudé
- souproudé
- křížové

Výhodami mokrých odlučovačů jsou schopnost zpracovávat plyny o vysokých teplotách i s vyšší vlhkostí a možnost současného odstraňování více nečistot různých skupenství současně.

Nevýhodou je snížení celkové účinnosti systému, protože plyn, který do pračky vstupuje přibližně při teplotě 250 °C je ochlazován vodou a z pračky vystupuje o teplotě pohybující se okolo 50 °C. Plyn tak výrazně ztrácí svou energii, kterou předává vodě, z které je obtížné získat ztracenou energii zpět. Kromě ztráty energie plynu vzniká při mokré vypírce poměrně velké množství dehtem znečištěné vody, pro kterou není žádné další využití. Proto je potřeba vybudovat systém pro uskladňování a čištění takto znečištěné vody. Ve výsledku jsou mokré pračky vhodné jen pro velká zařízení s velkými objemy čištěného plynu, kde je zaručena jejich návratnost. Mokré pračky pro menší provozy navíc dosahují velice nízkých účinností, a tak se v těchto případech obvykle používají jiné metody odstraňování nečistot [32][33].

5.1 Principy odstraňování nečistot

Obecně můžeme mokrou vypírku popsat jako zařízení obvykle válcového tvaru, které rozprašuje skrápěcí kapalinu do proudu plynu. Tím dochází k čištění plynu od různých nečistot. Mokrá vypírka je po určitých modifikacích schopna odstraňovat z plynu tuhé znečišťující látky, dehet, sirnaté sloučeniny, čpavek a další látky. Existují tři základní principy odstraňování nečistot v mokré pračce [32][34]:

- srážky nečistot s kapkami kapaliny
- kondenzace plyných látek
- chemická reakce

5.1.1 Srážky nečistot s kapkami kapaliny

Základem je rozstřikování skrápěcí kapaliny do prostoru mokré pračky. Vytvářejí se tak kapičky vody nebo jiné kapaliny, které propadávají pračkou a cestou prochází skrz čištěný plyn. Protože plyné látky mají malou hmotnost, kapičkám kapaliny se jednoduše vyhnou. Pevné částice se ale díky své vyšší hmotnosti nejsou schopné vyhnout kapalině a vlivem

setrvačnosti do ní naráží, čímž dojde k navázání pevné nečistoty na kapalinu. Navazováním pevných látek na kapalinu vzniká suspenze nebo v případě rozpouštění nečistot v kapalině roztok. Už z hlediska principu funkce mokrého odlučovače je zřejmé, že se kvalita a čistota prací kapaliny bude s časem zhoršovat. Proto je nutné ji průběžně čistit a podle potřeby doplňovat novou [32][34].

Místo rozstřikování kapaliny do plynu se naopak může využívat rozptýl plynů do kapaliny (tímto způsobem je například řešena pračka v experimentální části této práce). Princip ale zůstává stejný, a to styk pevných nečistot a kapaliny.

Mokré pračky mohou být konstruovány tak, aby dokázaly odstraňovat i pevné částice menší než 1 μm . Čištění takto jemných částic je možné, ale důsledkem je výrazný nárůst tlakové ztráty. Je tak nutné zvolit správný poměr mezi kvalitou čištění a dostatečně malou tlakovou ztrátou [34].

5.1.2 Kondenzace plynných látek

Tímto principem se z plynu odstraňuje zejména dehet. Ten v generovaném plynu sice může zvyšovat výhřevnost, ale při ochlazení dochází k jeho kondenzaci. Zkondenzovaný dehet na sebe nalepuje pevné nečistoty, díky čemu se v potrubí nebo v jiných částech zařízení vytvářejí nánosy, které ucpávají potrubí [35].

Jak již bylo zmíněno dříve, dehet je obecný pojem pro mnoho různých látek, které mohou mít různé vlastnosti – včetně teploty kondenzace. Některé dehtové látky kondenzují při mnohem vyšších teplotách než jiné. V mokré vypírce je tak nutno ochladit plyn na nejnižší teplotu, které plyn v celém svém průběhu zpracování dosáhne. To zajistí, že všechny dehet, který v plynu může zkondenzovat, zkondenzuje už v pračce, která je uzpůsobena pro jeho odstraňování [35].

Samotná kondenzace dehtu může probíhat na [32][33]:

- rozhraní kapalina-plyn
 - dle rozpustnosti dané prací kapaliny dochází k difuzi nebo absorpci
- stěnách pračky
 - je potřeba pravidelné čištění stěn pračky – např. ostříknutí vodou
- v nevyplněném prostoru pračky
 - vzniká tzv. dehtová mlha – soubor jemných kapiček o velikosti v řádech setin až jednotek mikrometru

5.1.3 Chemická reakce

Třetím způsobem odstraňování nečistot je chemická reakce s prací kapalinou. Kromě pevných nečistot a dehtu se mokrá vypírka používá pro čištění dalších látek jako čpavek, sloučeniny obsahující síru, halogenové kyseliny a další. Pro odstraňování těchto nečistot je potřeba použít vhodnou prací kapalinu, která bude po rozprášení v pračce chemicky reagovat s nečistotami v plynu a tím je odstraňovat [29][33].

5.2 Prací kapaliny

Nejzákladnější používanou prací kapalinou je samozřejmě voda. Použití jiných látek ale umožňuje odstranění nečistot, s kterými by si voda neporadila.

Důležitou charakteristikou je zde totiž pH látek, které nám určuje, zda se jedná o kyselou či zásaditou látku. Nabývá hodnot od 0 do 14, kde hodnota 7 je neutrální (hodnota pro vodu). Látky s pH menším než 7 jsou označovány jako kyseliny, látky s pH větším než 7 jako zásady. Pro odstraňování zásaditých látek z plynu je třeba použít kyselých kapalin a naopak [36].

Použitá prací kapalina se shromažďuje na dně zařízení, odkud je odváděna k čištění a její většina je opět vpuštěna do oběhu. V některých případech může být odpadní část kapaliny odvodněna a zlikvidována spálením nebo jinak využita [32][36].

5.2.1 Voda

Voda je základní prací kapalinou mokrých praček. Je vhodná pro odstraňování pevných nečistot a ochlazování plynu za účelem kondenzace. Z pracích kapalin způsobuje nejmenší provozní problémy a je nejlevnější. Při použití vody jako vypírací kapaliny pro odstraňování dehtu dochází k postupnému nasycování vody dehtem a po určitém množství absorbovaného dehtu už další dehtové částice nemusí být schopná jímat [34][36].

Při vypírání vodou dochází k tvorbě odpadní vody, kterou je nutno čistit. To vyžaduje výstavbu a provoz vodního hospodářství. Další nevýhodou je velká ztráta využitelného tepla plynu, který do mokré pračky vstupuje při teplotě obvykle okolo 250 °C a vystupuje při teplotě okolo 50 °C. Plyn v pračce předává své teplo prací kapalině, z které pak je složité získávat teplo zpět [37][38].

5.2.2 Kyselina sírová

H₂SO₄ je silná kyselina, která je jako prací kapalina vhodná pro odstraňování čpavku, který je zásaditý. Kromě kyseliny sírové se na odstranění čpavku mohou používat i jiné kyseliny jako například kyselina dusičná HNO₃ [39][40].



Produktem je síran amonný, který se využívá jako hnojivo.

Čpavek může být z plynu odstraňován také pomocí vody, ta se ale čpavkem postupně nasycuje a po maximálním nasycení není schopna čpavek dále jímat. Odstraňování čpavku z vody je navíc poměrně obtížné [38].

Pro správnou funkci je nutné udržovat pH v pračce obvykle mezi pH 3–6. To se ovlivňuje množstvím vstříkované kyseliny do prostoru pračky – při příliš nízkém pH se sníží množství rozstříkované kapaliny, při vysokém pH se naopak zvýší [40].

Pro velmi velké objemy plynu, z kterého má být čpavek odstraněn, je vhodnější použít více menších, paralelně zapojených praček než jednu velkou. Při požadavku na velmi nízkou koncentraci čpavku v plynu se zapojuje více praček sériově za sebou [40].

5.2.3 Vápencová suspenze

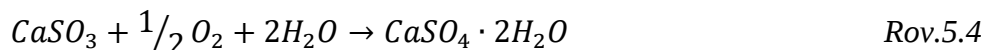
Vápencová suspenze je směs jemně mletého vápence CaCO₃ a vody. Používá se zejména pro odstraňování SO₂ a jiných kyselých složek jako HCl a HF. Suspenze je opět rozstříkována do plynu, kde reaguje s SO₂ a vytváří siřičitan vápenatý [33][41].



Místo vápence se dříve používalo i hašené vápno Ca(OH)₂.



Siřičitan vápenatý se po reakci s kyslíkem přeměňuje na sádrovec $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, který se využívá zejména ve stavebnictví.



Také u vápencové suspenze je nutno udržovat správné pH v pračce, to se v tomto případě upravuje množstvím dodávaného vápence. Směs vody a hašeného vápna je zásaditě s pH 12,5, zatímco směs vody s vápencem je přibližně neutrální [41].

5.2.4 Alkalické sloučeniny

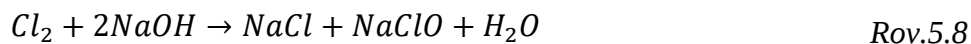
Mokré pračky využívající alkalických sloučenin jsou schopny odstraňovat širokou škálu nežádoucích látek jako kyselina chlorovodíková HCl, kyselina fluorovodíková HF, kyanovodík HCN, oxid siřičitý SO_2 , sulfan H_2S , chlor, organické kyseliny a další [42].

Pro odstraňování těchto nečistot se nejčastěji používá hydroxid sodný NaOH, hydroxid draselný KOH nebo hydrogenuhličitan sodný NaHCO_3 .

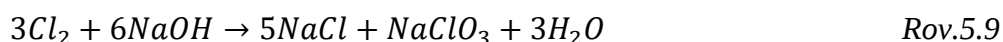


Některé zejména průmyslové odpadní plyny mohou obsahovat vysoký obsah chloru. Ten je vhodný odstraňovat právě pračkou na bázi alkalických sloučenin, které s halogeny reagují velice dobře [42].

Při provozní teplotě pračky při teplotách nižších než 20 °C je produktem chlorid sodný, voda a chlornan sodný, který se používá k dezinfekci nebo jako bělidlo [42].



Při teplotách okolo 75 °C se místo chlornanu sodného vytváří chlorečnan sodný, což je herbicid [42].



5.2.5 Organická kapalina

Další možností je kapalina na bázi organické kapaliny, což jsou různé typy olejů. Ty se vyznačují vysokou rozpustností dehtu a s tím související vysokou účinností odstraňování dehtu.

Při použití organické kapaliny vystupuje plyn z pračky při vyšších teplotách než v případě využití vody, obvykle nad 75 °C. Důvodem je nežádoucí kondenzace vody, která by v pračce probíhala při nižších provozních teplotách a znehodnocovala by organickou kapalinu. V tomto případě je ale následné ochlazení plynu možné, protože organická kapalina snižuje rosný bod výrazně pod teplotu vypírky.

Nevýhodou je samozřejmě vyšší cena organické kapaliny, která se v průběhu čištění odpařuje a je nutno ji průběžně doplňovat [32][38].

5.3 Zařízení pro mokrou vypírku

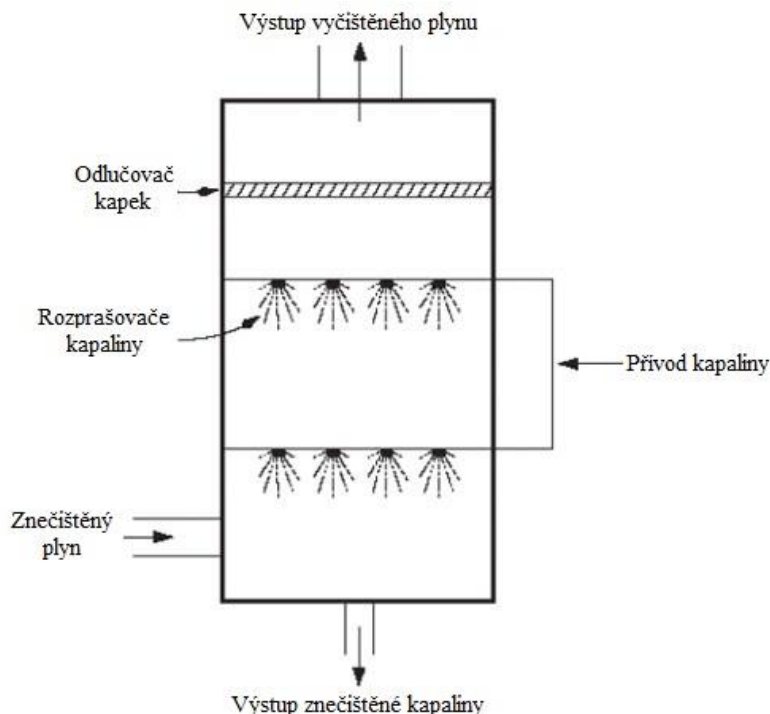
Existuje mnoho typů mokrých praček, všechny ale různými způsoby zajišťují styk čištěného plynu s prací kapalinou. Každý typ pračky má samozřejmě své výhody a nevýhody, má jinou tlakovou ztrátu a může být vhodnější pro odstraňování daných nečistot.

5.3.1 Sprchová věž

Nejzákladnějším zařízením mokré vypírky a velice dobrým příkladem principu funkce mokré vypírky je sprchová věž. To je zařízení kruhového tvaru, ve kterém je v horní části rozstřikovávána prací kapalina. Ta propadává pračkou a prostupuje plynem, který do věže vstupuje obvykle tangenciálně ve spodní části a vystupuje axiálně v horní části. Kapičky prací kapaliny při průchodu plynem narážejí do pevných nečistot, které strhávají a odnášejí sebou, ochlazují plyn a pokud je prací kapalinou látka jiná než voda, také chemicky reagují s látkami v plynu. Po průchodu věží je kapalina shromažďována na dně, odkud je pomocí čerpadel zajištěna její cirkulace zpět k tryskám [34][43][44].

Vnitřní prostor sprchové věže bývá většinou bez výplně, může ale být také s výplní (rošty, mříže, žaluzie), která zvyšuje plochu, na které může plyn s kapalinou reagovat. Na druhou stranu ale výrazně navyšuje tlakovou ztrátu [44].

Sprchová věž musí být navržena a zkonstruována tak, aby nedocházelo k odnášení kapek kapaliny společně s plynem. Maximální rychlost plynu ve volném průřezu věže by neměla překročit $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, pokud není věž vybavena odlučovači kapek. Pokud věž má odlučovače, je možná maximální rychlost asi $2,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Nižší rychlosti proudění plynu snižují tlakovou ztrátu, ale zvyšují nároky na velikost nebo počet sprchových věží [34].

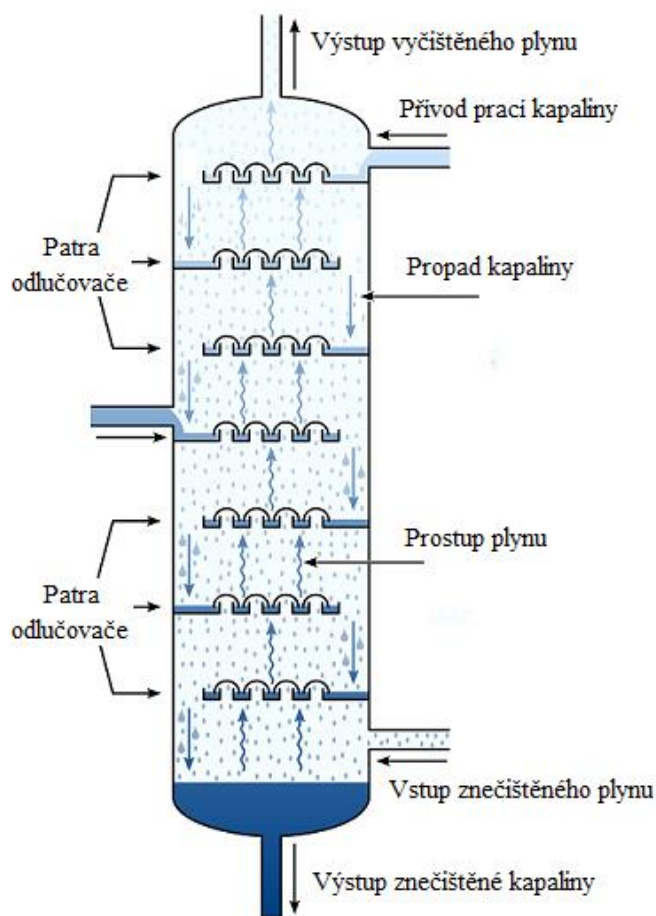


Obr. 5.1 Schéma sprchové věže [44]

5.3.2 Pěnový (patrový) odlučovač

V pěnovém odlučovači plyn stejně jako ve sprchové věži vstupuje ve spodní části a vystupuje v horní. Každý pěnový odlučovač má několik pater, kde každé patro je vyrobeno

z plechu s otvory o průměru přibližně 5–7 mm nebo roštem s otvory podobné velikosti, popřípadě je prostup plynu skrz patro vyřešen jiným způsobem. Prací kapalina je přivedena na první patro a postupně stéká do pater nižších, zatímco plyn prostupuje otvory v patrech skrze kapalinu a vystupuje horní částí zařízení. Pěnový odlučovač je obvykle vybaven odlučovači kapek, rychlost ve volném průřezu by tak opět neměla přesáhnout $2,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Rychlost proudění v otvorech pater je ale přibližně pětikrát vyšší, díky čemu vzniká na každém patře vodní tříšť, která připomíná pěnu. Odtud je tedy odvozen název pěnový odlučovač. Ve skutečnosti ale není do prací kapaliny přidáváno žádné aditivum, které by mělo pěnu vytvářet [34][44].

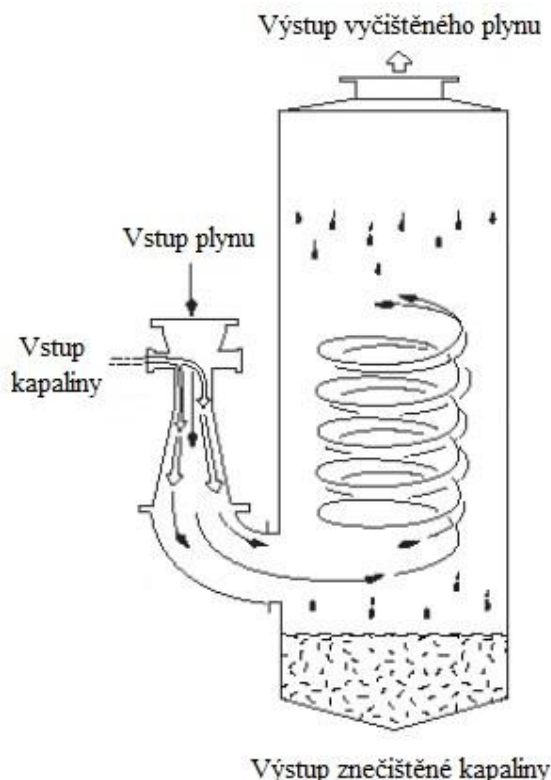


Obr. 5.2 Schéma pěnového (patrového) odlučovače [45]

5.3.3 Venturiho pračka

Venturiho pračka se od sprchové věže a pěnového odlučovače liší svou konstrukcí. Před samotnou pračkou je vstupní hrdlo, do kterého vstupuje vysokou rychlostí čištěný plyn, který strhává kapičky prací kapaliny. To zajišťuje vytvoření velice jemných kapiček, což usnadňuje kontakt kapaliny s nečistotami. Už při tomto prvním kontaktu dochází ke srážkám nečistot s kapalinou. Další dočištění probíhá v samotné pračce, kde navíc dochází k odstranění kapiček vody z plynu za pomoci odstředivé síly [34][44].

Venturiho odlučovač dosahuje vysoké účinnosti odloučení TZL – 98 až 99 % i pro částice velikosti kolem $1 \mu\text{m}$. Velkou nevýhodou je ale velmi vysoká tlaková ztráta, která je zapříčiněna vysokými rychlostmi proudění [34].



Obr. 5.3 Schéma Venturiho pračky [44]

5.3.4 Ejektorová pračka

Velice podobně jako Venturiho pračka funguje ejektorová pračka. Jediným rozdílem je, že plyn je strháván kapalinou (u Venturiho pračky naopak plyn strhává kapalinu).

Je vhodnější pro plyn obsahující větší pevné částice. Odlučivost pro částice nad $4\text{ }\mu\text{m}$ je 99 %, pro částice nad $2\text{ }\mu\text{m}$ přibližně 90 %. Pro zvýšení účinnosti se ejektorové pračky řadí sériově za sebe [34].

5.3.5 Hladinový odlučovač

V tomto typu mokré pračky probíhá k odstraňování nečistot na hladině prací kapaliny. Toho se dosahuje tak, že čištěný plyn je naváděn vodícími plechy pod vhodným úhlem na hladinu. Plynná část plynu se od hladiny odrazí (změní směr), zatímco pevné nečistoty narážejí na hladinu a zachycují se v kapalině. V místě, kde plyn narážejí na hladinu, dochází k strhávání kapaliny a vytvoření vodní tříště, která odlučování nečistot pomáhá [34].

Před výstupem ze zařízení prochází plyn vodní clonou, která zachycuje nečistoty neodloučené na hladině a odlučovačem kapek, který odstraňuje kapičky z plynu [34].

Důležitým pro tento typ mokré vypírky je průběžné doplňování prací kapaliny, protože výška hladiny má hlavní vliv na správnou funkci tohoto typu mokré pračky [34].

6 Způsoby odstraňování nečistot

Jak již bylo pospáno v předchozí kapitole, mokrá vypírka je velice univerzální technologií čištění plynu. Prakticky je možné navrhnout, sestavit a provozovat pračku pro čištění jakéhokoliv druhu nečistot, a to i při vysokých požadavcích na čistotu plynu [34].

V některých případech je ale výstavba a provoz vodního hospodářství zbytečné a může být vhodnější použít jiný způsob odstraňování nečistot.

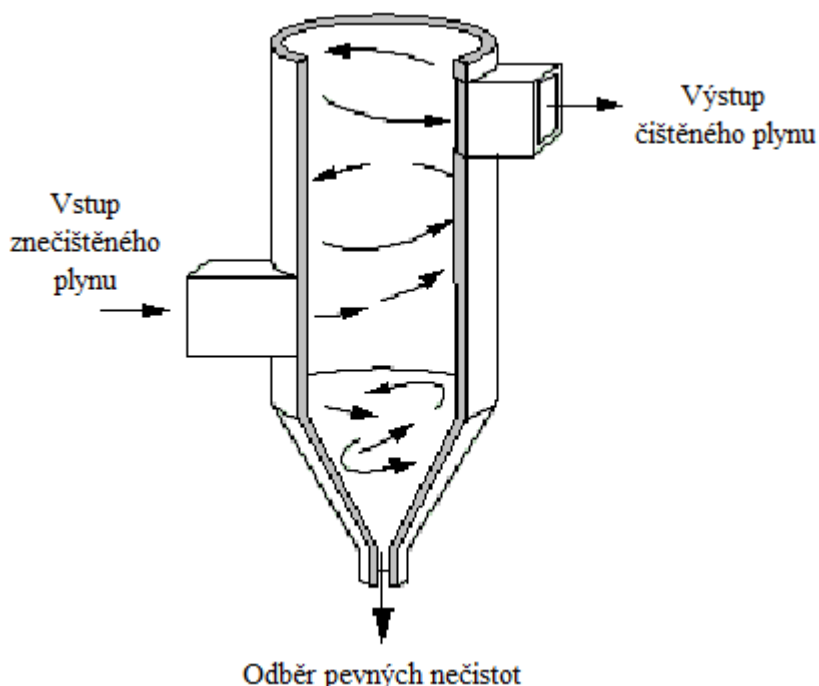
6.1 Odstraňování TZL

Základní technologie pro odstraňování pevných látek jsou [34][46]:

- cyklonové odlučovače
- bariérové filtry
- elektrostatické odlučovače
- mokré pračky

6.1.1 Cyklonové odlučovače

Cyklonový odlučovač je zařízení, které využívá k odlučování pevných částic gravitační a odstředivé síly. Znečištěný plyn vstupuje do válcové části odlučovače, kde je nucen ke kruhovému pohybu, při kterém na pevné částice působí odstředivé síly, které unášejí částice na stěnu cyklonu a poté otvorem ve spodní části odlučovače ven. Podmínkou je, aby byla hmotnost pevných částic vyšší než hustota nosného média [46][48].



Obr. 6.1 Schéma cyklonového odlučovače [48]

Společně s cyklonovými filtry je možné odstranit přibližně 90 % pevných částic s průměrem větším než 5 μm a také menší část částic s průměrem 1–5 μm . Cyklonové odlučovače se často také řadí za sebou, kde první zachycuje největší částice a každý následný cyklon odstraňuje částice s menšími průměry [34][46].

Výhodou cyklonových odlučovačů je jejich jednoduchost, nízké pořizovací i provozní náklady a menší citlivost odlučivosti na změny průtoku plynu. [34].

Nevýhodou je nízká účinnost, velká tlaková ztráta a velké rozměry zařízení. Navíc nejsou vhodné pro plyny s vysokou relativní vlhkostí nebo pro hygroskopické prachové částice [34].

6.1.2 Bariérové filtry

Bariérové filtry obsahují velký rozsah nejrůznějších materiálů, které se dají rozdělit do tří základních skupin [49]:

- filtrační tkaniny
- zrnité vrstvy
- porézní hmoty

Tyto materiály jsou porézní – to znamená, že umožňují průchod plynu, ale zabráňují průchodu pevných látek. Efektivně odstraňují částice o průměru 0,5 – 100 μm . Je možné vytvořit filtr pro téměř jakékoliv rozměry částic, ale filtry pro velice malé částice rapidně navyšují tlakovou ztrátu. V praxi tak existuje určitá hranice, kdy už se čištění jemnějších částic nevyplácí [34][49].

Bariérové filtry jsou vhodné pro odstraňování zejména suchých částic a méně vhodné pro vlhké či lepkavé částice, které by porézní materiál ucpávaly. U bariérových filtrů je nutné jejich pravidelné čištění. To se obvykle provádí profukem proti směru proudění čištěného plynu.

Výhodou je opět jednoduchost a nezávislost na dalším zdroji energie, ale také vyšší účinnost než u cyklonových odlučovačů [20].

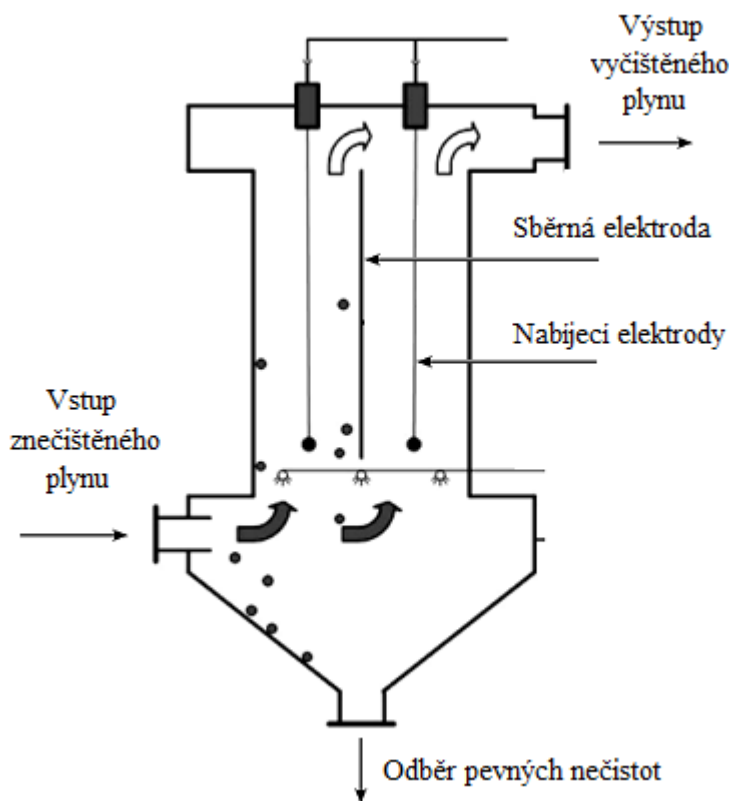
Nevýhodou je zejména velká tlaková ztráta, prudce narůstající při čištění jemnějších částic. Navíc je potřeba filtry pravidelně čistit, popř. měnit za nové. Bariérové filtry nejsou vhodné pro plyny obsahující vlhké nebo lepkavé částice [20].

6.1.3 Elektrostatické odlučovače

Dalším způsobem odstraňování TZL jsou elektrostatické odlučovače. V tomto typu odlučovačů prochází čištěný plyn okolo elektrod, které nabíjí tuhé částice (obvykle záporným nábojem). Po průchodu okolo elektrod pak plyn a elektricky nabitě částice procházejí kolem usazovacích deskových elektrod s opačnou polaritou (kladným nábojem). Na záporně nabitě částice tak působí elektrostatická síla, která je přitahuje ke kladně nabitým usazovacím elektrodám, na které se částice nalepují. Z tohoto důvodu je nutné pravidelné čištění elektrod. Využívá se suchá i mokrá metoda čištění. V případě suché metody dochází k pravidelnému mechanickému odlučování nečistot z usazovacích elektrod a může být použita i při vysokých teplotách (500 °C a více). Mokrá metoda využívá malé množství vody tekoucí přes usazovací elektrody. Z tohoto důvodu je možné mokrou metodu využívat jen při teplotě plynu do přibližně 65 °C [34][50][51].

Výhodami elektrostatických odlučovačů je vysoká účinnost odloučení, nízká tlaková ztráta a provoz i při vyšších teplotách [51].

I přes tyto výhody nejsou elektrostatické odlučovače v praxi příliš využívány. Hlavním důvodem je jejich vysoká pořizovací cena. Proto jsou elektrostatické odlučovače využívány jen ve velkých provozech, kde bude zaručena jejich finanční návratnost [51].



Obr. 6.2 Schéma elektrostatického odlučovače [34]

6.1.4 Mokrý odlučovač

Pro odstraňování TZL je možno použít jakýkoliv typ mokré pračky. Který z nich to bude závisí na mnoha faktorech. Těmi nejzákladnějšími jsou velikost a množství pevných nečistot, požadovaná čistota výstupního plynu, povolená tlaková ztráta nebo pořizovací a provozní náklady.

TZL jsou v mokrých odlučovačích odstraňovány díky srážkám s kapičkami prací kapaliny. Tento princip byl stejně jako další principy odstraňování nečistot popsán v kapitole 5.1.

6.2 Odstraňování dehtu

Mimo TZL je velkým problémem u zplyňování biomasy dehet. Hlavním problémem je vytváření těžce odstranitelných nánosů uvnitř všech zařízení přicházejících do styku s dehtem znečištěným plynem, což má za následek výrazné ovlivnění funkčnosti zařízení. Existuje několik způsobů odstraňování dehtu z plynu, které se obecně dají rozdělit na primární a sekundární opatření [23].

6.2.1 Primární metody odstraňování dehtu

Redukce obsahu dehtu v plynu pomocí primárních metod spočívá ve snížení množství dehtu přímo v reaktoru. Tyto metody nevyžadují pořízení a umístění dalšího zařízení za reaktor,

ale jejich účinnost obvykle není dostatečná. Proto se primární a sekundární metody odstraňování často kombinují [52][53].

Existují dvě základní primární metody odstraňování dehtu, a to termický a katalytický rozklad. Principem obou metod je štěpení molekul těžkých dehtů na jednodušší výhřevné látky jako CO, H₂ a CH₄ nebo lehčí uhlovodíky, které mají nižší teplotu kondenzace [53][54].

Primární metody jsou samozřejmě použitelné jen při zplyňování, u odpadních plynů je obvykle nutno si vystačit se sekundárními opatřeními.

Termický rozklad

Principem termického rozkladu dehtu je štěpení dehtu při vysokých teplotách na CO a H₂, popř. lehčí uhlovodíky. Podmínkou pro štěpení dehtu jsou teploty nad cca. 1200 °C, která už je poměrně vysoká a při které můžeme narážet na problémy s tepelnou odolností materiálů. Navíc se obvykle při zplyňování biomasy takto vysokých teplot nedosahuje. Pokud bychom se z nějakého důvodu rozhodli pro tento způsob odstraňování dehtu, mohli bychom dostatečně vysoké teploty v reaktoru dosahovat částečným spalováním vyrobeného plynu, což ale ve výsledku může vést ke snížení výhřevnosti plynu o 25–30 %. Termický rozklad tak není příliš vhodným způsobem odstraňování dehtu z plynu [54].

Katalytický rozklad

Katalytický rozklad funguje podobně jako termický rozklad – štěpení těžkých dehtů. Oproti termickému rozkladu ale není potřeba až tak vysokých teplot, protože do zplyňovacího zařízení se přidává katalyzátor, který snižuje teplotu potřebnou pro štěpení dehtu. Katalyzátor je látka, která vstupuje do chemické reakce, kterou urychluje, a vystupuje z ní nezměněná. Jako katalyzátor pro katalytický rozklad dehtu je možno použít poměrně velké množství materiálů, nejčastěji se pro svou dostupnost, cenu a dostatečně vhodné vlastnosti používá dolomit [52][54].

Na průběh katalytického rozkladu má velký vliv typ zplyňovacího zařízení. Např. zplyňovací zařízení s fluidním ložem dosahuje vysokých teplot a turbulentního proudění, díky čemu probíhají reakce velice intenzivně, ale dochází k otěru katalyzátoru. Naopak zplyňovací zařízení s pevným ložem nezajišťuje dostatečný kontakt dehtu s katalyzátorem a nedochází tak k dostatečnému štěpení dehtu [54].

6.2.2 Sekundární metody odstraňování dehtu

Pokud při zplyňování nebyla použita jedna z primárních metod odstraňování dehtu, popř. pokud je obsah dehtu v plynu i po použití primární metody stále vysoký nebo pokud čistíme odpadní průmyslový plyn, je potřeba využít jednu ze sekundárních metod čištění. To jsou takové metody čištění, které probíhají v dodatečném zařízení mimo zplyňovací reaktor. Opět se může jednat o suché či mokré metody. U suchých metod je plyn ochlazován a následně čištěn pomocí filtrů. Nastávají však problémy se zanášením a likvidací vyloučených dehtů. Navíc jsou zařízení pro suché metody čištění prostorově větší. V případě mokrých metod se plyn dostává do styku s vodou, která plyn od dehtu čistí. Nevýhodou je opět produkce odpadních vod [54].

Katalytické čištění

Katalytické čištění patří k metodám odstraňování dehtu s nejvyšší účinností. Může se jednat o homogenní a heterogenní katalýzu. Při homogenní katalýze jsou reaktanty

a katalyzátor ve stejné fázi, při heterogenní je katalyzátor nejčastěji pevný a reaktanty plynné látky. Existuje velké množství použitelných katalyzátorů. Některé katalyzátory jsou samozřejmě pro dané zplyňovací zařízení, palivo atd. vhodnější než jiné, důležitým faktorem je však cena. V případě použití katalyzátorů se dehet nalepuje přímo na katalyzátor, proto je potřeba zajistit jeho pravidelné čištění [54].

Katalyzátory můžeme dělit na přírodní a uměle vyrobené. Přírodní katalyzátory bývají levnější a dostupnější, ale pro jejich správnou funkčnost je potřeba jejich větší množství a vyšší teplota. Nejčastěji používanými přírodními katalyzátory jsou vápenaté materiály jako vápno CaO , vápenec CaCO_3 a dolomit $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Uměle vyrobené katalyzátory jsou nejčastěji vyrobeny ze sloučenin niklu. Výhodou je vysoká účinnost, menší potřebné množství a teplota než v případě přírodních katalyzátorů. Nevýhodou je jejich vysoká cena, ale také tzv. otrava katalyzátoru, ke které dochází, pokud jsou v čištěném plynu obsaženy sloučeniny síry, která způsobuje deaktivaci a tím nefunkčnost katalyzátoru [54].

Mokrý pračka

Mokrý pračka je kromě odstraňování TZL vhodná také pro odstraňování dehtu. Odstraňování TZL u mokré vypírky funguje tak, že kapičky vody na sebe nalepují částice TZL a tím je z plynu odstraňují. Dehty jsou ale plynné látky a tímto způsobem při mokré vypírce odstraňovány nejsou. Princip odstraňování dehtů je takový, že dehty v palivu kondenzují při určité teplotě. Cílem tedy je, aby v pračce došlo k dosažení tak nízké teploty, na kterou se plyn v průběhu všech svých úprav a zpracování dostane. Tím je dosaženo toho, že všechny sloučeniny dehtu, které v celém procesu zkondenzují, kondenzují právě v mokré pračce a pokud plyn nepodkročí teplotu, na kterou se dostal v pračce, nedojde v zařízeních pracujících s daným plynem ke zkondenzování žádného dalšího dehtu [32].

Jako prací tekutina se kvůli své dostupnosti a nízké ceně využívá voda. Je však možno použít i jiné látky, například organické kapaliny, které mají vyšší rozpustnost dehtu než voda [32].

6.3 Odstraňování síry

Protože biomasa obsahuje jen malé množství síry, obvykle při jejím zplyňování není potřeba z plynu odstraňovat sirnaté sloučeniny. Některé odpadní plyny ale mohou obsahovat vyšší množství síry, kterou tak je z plynu nutno odstraňovat.

Existují tři základní metody odstraňování síry, a to je spalování paliva s příměsí sorbentu, mokrá vápencová vypírka a polosuchá metoda odsiřování.

6.3.1 Spalování paliva s příměsí sorbentu

Jedná se o suchou metodu odsiřování a současně o nejjednodušší způsob odstraňování síry. Sorbent je ve vhodném množství dávkován současně s palivem přímo do spalovací komory, kde probíhá i samotný proces odsiřování. Sorbent je zásaditá látka, která reaguje s kyselými složkami plynu a adsorbuje je. Nejčastěji používaným sorbentem pro svou dobrou dostupnost a nízkou cenu je vápenec CaCO_3 , případně pálené vápno CaO . Mohou se ale používat i jiné látky, např. oxid vanaditý V_2O_5 , oxid zinečnatý ZnO a oxidy některých dalších kovů. V České republice jsou však dostatečné zásoby vápence, takže se jiné sorbenty v praxi využívají jen ve výjimečných případech [55][56].

Při použití vápence CaCO_3 dochází při teplotách vyšších než $850\text{ }^\circ\text{C}$ ke kalcinaci vápence [57].



Oxid vápenatý CaO pak při teplotách v rozmezí přibližně $600\text{--}1000\text{ }^\circ\text{C}$ reaguje s oxidem siřičitým za vzniku síranu vápenatého CaSO_4 . Ten je poté odloučen společně s tuhými znečišťujícími látkami v odlučovači za reaktorem [56][57].



Účinnost tohoto procesu závisí na teplotě a vlhkosti spalin, množství sorbentu, jemnosti mletí sorbentu či době styku sorbentu s plynem [57].

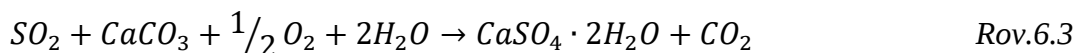
V praxi se tato metoda využívá jen u fluidních kotlů, které zajišťují dostatečnou dobu setrvání sorbentu ve spalovacím procesu. U klasických kotlů je udávána účinnost odsíření do 50 %, u fluidních kotlů se stacionární fluidní vrstvou 60 %, s bublající fluidní vrstvou přesahuje 60 % a u kotlů s cirkulující fluidní vrstvou je možno dosáhnout účinnosti přesahující 90 % [57].

Při dávkování je nutné udržovat dostatečný poměr sorbentu a síry v palivu, což je v praxi problém, protože množství síry v palivu se může výrazně měnit. Navíc nelze zajistit, aby reagoval všechny sorbent. Proto se používá nadbytek sorbentu, což má za následek jeho velkou spotřebu [57].

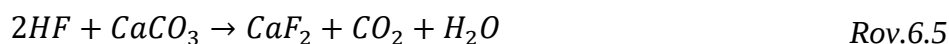
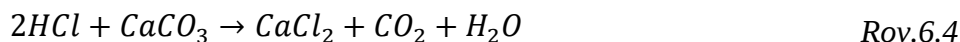
6.3.2 Mokrý vápencová vypírka

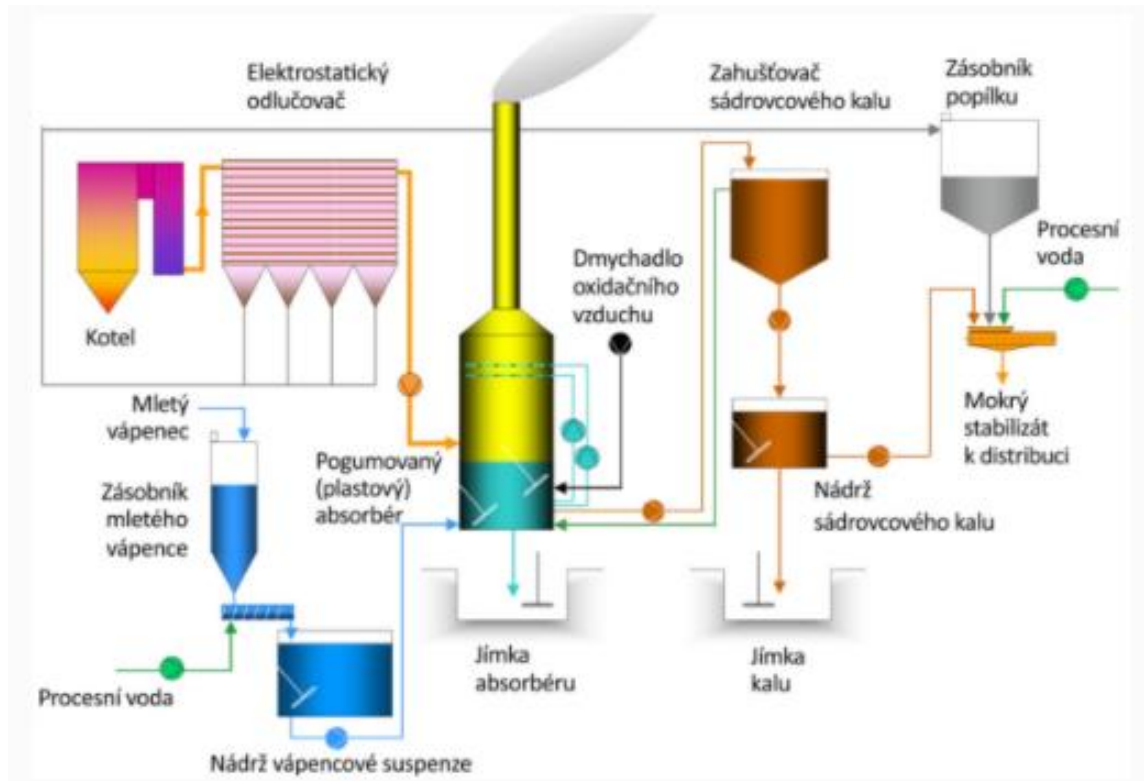
V praxi nejčastěji využívanou metodou mokré pračky je beze sporu mokrá vápencová vypírka. Jedná o obdobu mokré pračky, která se používá při odstraňování sloučenin síry. Do rozprašované vody je přidán vhodný sorbent, nejčastěji mletý vápenec CaCO_3 (odtud pochází název mokrá vápencová vypírka). Tato suspenze je rozprašována do absorbéru, kde chladí a současně vypírá čištěný plyn. Produktem mokré vápencové vypírky je sádrovcový kal, který je po svém výstupu z absorbéru nutno rychle zpracovat, protože velice rychle sedimentuje. Po dostatečném zahuštění a následném vysušení je produktem tzv. energosádrovec, který se používá zejména ve stavebnictví (sádrokartonové desky) [56][57].

Sumární reakce mokré vápencové vypírky vypadá následovně [57]:



Výhodou této metody je současné odstraňování chlorovodíku HCl a fluorovodíku HF s účinností přesahující 90 % [57]:





Obr. 6.3 Schéma mokré vápencové vypírky [58]

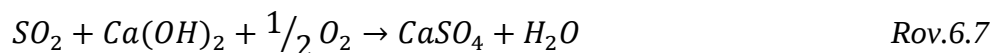
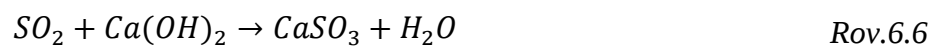
Obr. 6.3 znázorňuje schéma mokré vápencové vypírky. Absorbér je díky svému velmi kyselému prostředí materiálově náročné zařízení, pro jeho výrobu jsou používány speciální oceli, které navíc bývají pro dodatečnou ochranu před korozí pogumovány [59].

Mokrá vápencová vypírka dosahuje vysoké účinnosti odstranění síry z plynu, pořizovací cena tohoto systému je ale vysoká, a proto je vhodná jen pro velké provozy s velkými objemy čištěného plynu. V dnešních velkých tepelných elektrárnách je ale nejčastěji používanou metodou odsiřování spalin [57][59].

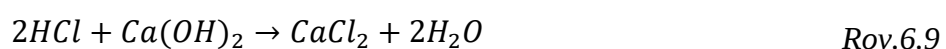
6.3.3 Polosuchá metoda odsiřování

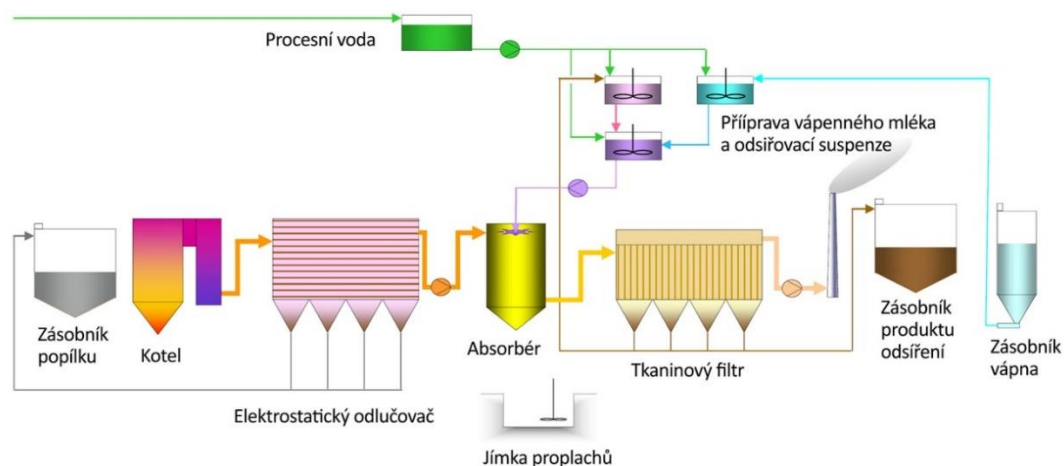
Je kompromisem mezi suchými a mokkými metodami odsiřování. Do plynu se pomocí rotačního rozprašovače přivádí vodní suspenze hydroxidu vápenatého Ca(OH)_2 [56][57].

Reakce sirnatých sloučenin s hydroxidem vápenatým [57]:



Všechna voda se během procesu vypaří a výsledný produkt je suchý. Polosuchá metoda částečně odstraňuje také chlorovodík HCl a fluorovodík HF [57]:





Obr. 6.4 Schéma polosuché metody odsíření [60]

Tento způsob odsiřování se používá zejména ve větších zařízeních, která ale nejsou dostatečně velká pro použití mokré vápencové vypírky. V současné době se využívá například ve spalovnách odpadů [61].

7 Experimentální část

Největším problémem zplyňování je vysoký obsah dehtu v generovaném plynu. Jedním z vhodných řešení tohoto problému je čištění plynu v mokré pračce. Jak bylo zmíněno v předchozích kapitolách, účinnost mokré pračky může být ovlivněna konstrukcí pračky nebo použitou prací kapalinou. Určitý vliv na účinnost odstraňování dehtu z plynu má ale také teplota prací kapaliny, a právě tato problematika bude hlavním cílem praktické části diplomové práce.

7.1 Popis experimentu

K tomuto účelu byla sestrojena jednoduchá mokrá pračka, která je určena k čištění generovaného plynu z fluidního zplyňovacího reaktoru. Přestože je mokrá pračka schopna odstraňovat také pevné nečistoty, je mezi zplyňovací reaktor a pračku umístěn jednoduchý filtr pro odstranění nejhrubších pevných nečistot, aby nedocházelo ke zbytečnému znečišťování vody v pračce a tím snižování její účinnosti odstraňování dehtu. Za pračkou je umístěna odběrová trať sloužící ke zhodnocení obsahu dehtu v plynu. Pračkou a poté samotnou odběrovou trati se nechá projít jeden vzorek plynu, tedy 100 litrů. Současně je ale také nutno provádět odběr plynu pomocí obdobné trati pro plyn před pračkou, což nám umožní porovnat obsah dehtu v generovaném plynu očištěného v mokré pračce a obsah dehtu v surovém generovaném plynu. Odběrovou trať podrobně popisuje kapitola 7.2.1.

Bude provedeno několik měření, která se od sebe budou lišit teplotou prací kapaliny. Předpokládanými vhodnými teplotami vody pro experimentu jsou teploty 4 °C, 20 °C a 40 °C. Teplota 4 °C je nejnižší předpokládaná teplota vody v pračce, které v našich podmínkách budeme schopni dosáhnout. Předpokládá se, že účinnost odstranění dehtu bude s rostoucí teplotou vody klesat.

Po pročištění jednoho vzorku plynu (100 l) je nutné prací kapalinu v pračce vyměnit za novou. Při čištění plynu totiž dochází k postupnému nasycování vody dehtem a tím ke snižování účinnosti vypírky. V praxi využívaných pračkách je tento problém vyřešen průběžným čištěním a doplňováním vody. V našem případě stačí, když bude po každém měření prací kapalina vyměněna za novou, což zajistí stejné podmínky pro každé z měření.

7.2 Použité metody měření

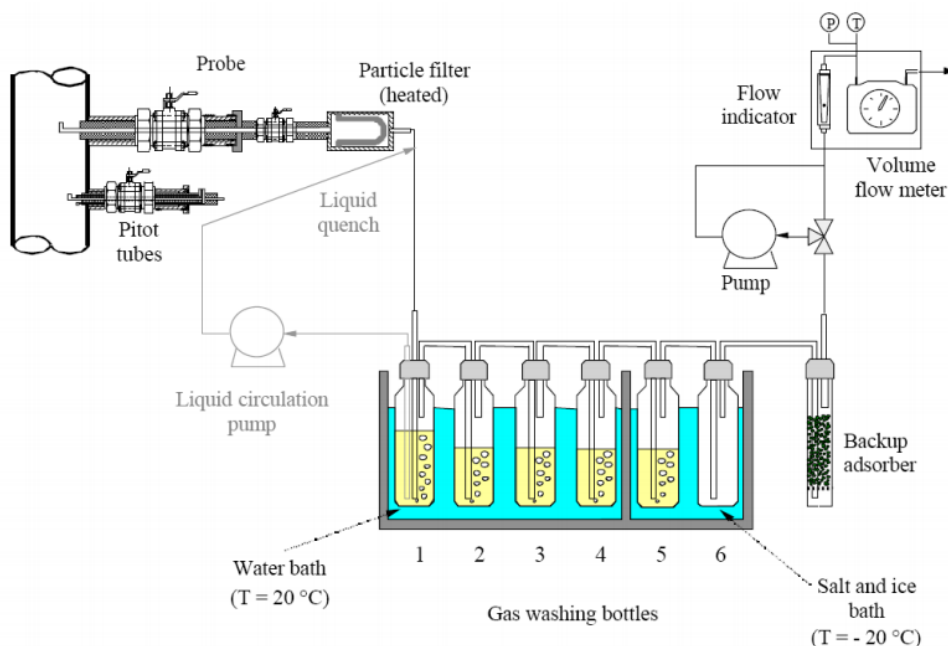
Sledovanými vlastnostmi plynu bude množství a složení dehtu, k čemuž slouží odběrová trať dehtu a složení samotného plynu, které bude zjišťováno pomocí jednorázových odběrů před každým měřením.

7.2.1 Odběrová trať dehtu

Pro vyhodnocení obsahu dehtu v generovaném plynu neexistuje žádná norma, podobně uznávaným dokumentem je ale tzv. Tar protocol. Jeho cílem je standardizovat definici dehtu, jeho odběr a analýzu, což umožňuje porovnávat výsledky z různých pracovišť.

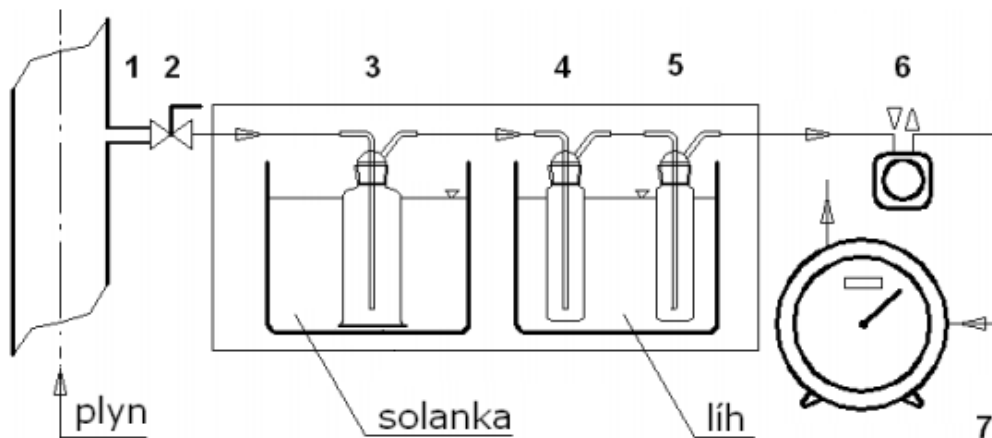
Schéma odběrové trati pro vyhodnocení obsahu dehtu dle Tar protocolu je znázorněno na obr. 7.1. Hlavními částmi jsou [62]:

- odběrová sonda a filtr tuhých nečistot
- promývačky s absorbérem
- záložní sběrač zbytkového dehtu
- zařízení na podporu průtoku a měření množství protečeného plynu



Obr. 7.1 Schéma odběrové trati dle Tar protocol [62]

Na VUT se při zjišťování obsahu dehtu v plynu používá mírně modifikovaná verze této trati znázorněna na obr. 7.3. Plyn je odebírán odběrovou trubicí (1), prochází přes kulový ventil (2) a spojovací hadičkou prochází do promývaček s acetonem (3,4 a 5), které jsou pro větší intenzitu vypírání naplněny také skleněnými kuličkami s průměrem 4 mm. První promývačka (3) je ponořena v solance (roztok soli ve vodě) o teplotě okolo -10 °C . Další dvě promývačky (4 a 5) jsou ponořeny v lihové lázni o teplotě -39 °C . Po průchodu promývačkami prochází plyn čerpadlem (6) a bubnovým plynoměrem (7) [54].



Obr. 7.2 Schéma upravené odběrové trati [54]

Na obr. 7.3 je vyfocena reálná odběrová trať použitá při měření.



Obr. 7.3 Reálná odběrová trať

Na obr. 7.4 si můžete všimnout, že jedno chladicí zařízení sloužilo pro obě odběrové trati současně.



Obr. 7.4 Chladicí zařízení současně chladicí odběry před pračkou i za pračkou

7.2.2 Jednorázové odběry plynu

Důležitou vlastností generovaného plynu je jeho složení, které se zjišťuje ze vzorků odebraných pomocí skleněných vzorkovnic. To jsou nádoby se dvěma kohoutky na vrchní i spodní straně. Vzorkovnice se naplní vodou a z vrchní strany se připojí odběrová hadice s plynem a poté se otevřou oba kohoutky. Voda tak začne vytékat ze spodní části vzorkovnice,

zatímco ve vrchní části je do ní pod tlakem nasáván generovaný plyn. Po vypuštění veškeré vody se zavrou oba kohoutky a vzorkovnice tak obsahuje pouze generovaný plyn. Vzorkovnice poté byly poslány na analýzu pomocí plynového chromatografu v laboratořích na EÚ v Brně.



Obr. 7.5 Provádění odběrů plynů pomocí vzorkovnice

Provádělo se několik odběrů surového generovaného plynu i plynu za pračkou. Každou vzorkovnici bylo potřeba správně popsat, aby nedošlo k záměně (obr. 7.6).



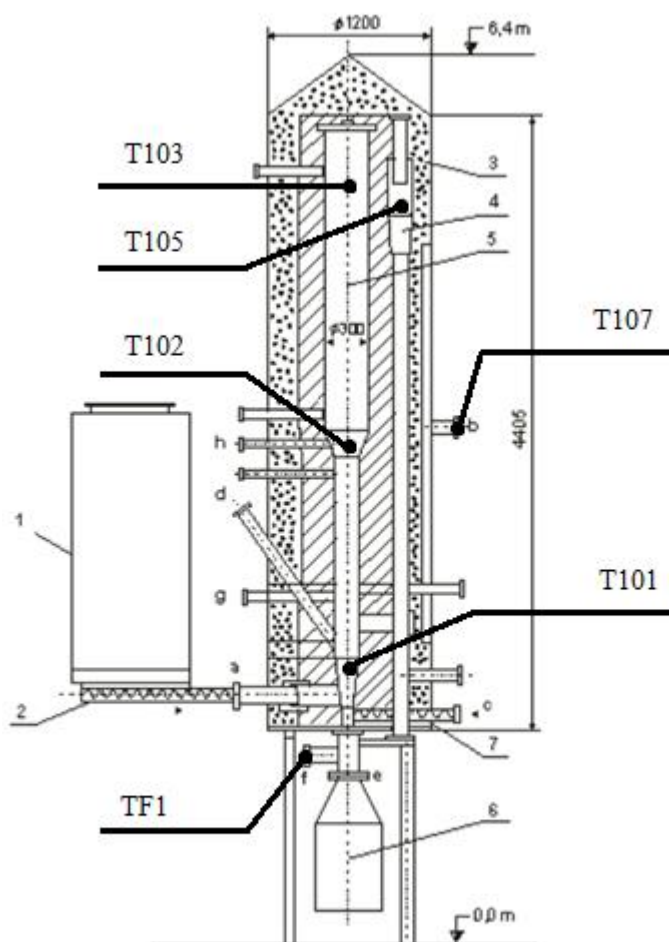
Obr. 7.6 Vzorkovnice obsahující vzorky plynu

7.3 Zplyňovací zařízení Biofluid

K výrobě plynu bylo použito zařízení Biofluid, což je atmosférický zplyňovací generátor se stacionárním (bublajícím) fluidním ložem. Nachází se v těžkých laboratořích Energetického ústavu na VUT v Brně a může fungovat také ve spalovacím režimu [54].

Parametry reaktoru:

- | | |
|---------------------------------|---|
| 1. výkon (v produkovaném plynu) | 100 kW _t |
| 2. příkon (v palivu) | 150 kW _t |
| 3. spotřeba dřeva | 30 kg·hod ⁻¹ |
| 4. průtok vzduchu | 40 m _n ³ ·hod ⁻¹ |



Obr. 7.7 Schéma zplyňovacího zařízení Biofluid [63]

1 – zásobník paliva; 2 – šnekový dopravník paliva; 3 – tepelná izolace; 4 – cyklónový odlučovač; 5 – reaktor; 6 – zásobník popele; 7 – šnekový dopravník polokoksu

a – dávkování paliva; b – výstup plynu; c – vstup popele; d – otvor pro zapalování; e – odvod popele; f – primární vzduch; g – sekundární vzduch; h – terciální vzduch

7.4 Návrh čistící trati

Jak bylo zmíněno v řešební části, mokrá pračka je finančně nákladná na výstavbu i na provoz a je tak vhodná jen pro dostatečně velká zařízení, u kterých nebude provoz mokré pračky příliš velkou přítěží. Menší pračky určené pro menší průtoky plynu navíc nedosahují dostatečně vysoké účinnosti. Pro experimentální ověření účinnosti odstranění dehtu v závislosti na teplotě vypírací kapaliny ale bude stačit jednoduché zařízení, které bude jakýmkoliv způsobem zajišťovat dostatečný kontakt čištěného plynu s prací kapalinou.

K tomuto účelu byla navržena jednoduchá mokrá pračka, která se od mokrých praček popsaných v předchozí kapitolách poměrně výrazně liší. Skládá se ze skleněné nádrže, která je naplněna vodou a obsahuje čtyři sériově zapojené promývačky. Ty jsou také naplněny vodou, ale voda v nádrži se s vodou v promývačkách nijak nemísí. Plyn tak po výstupu ze zplyňovacího zařízení prochází potrubím o vypočtené délce, prostupuje přes filtr tuhých nečistot a vstupuje do první promývačky pod hladinu kapaliny. Tam probublává k hladině, což zajišťuje kontakt plynu s kapalinou a poté je odváděn do druhé promývačky, kde se podobný proces opakuje. Po průchodu čtvrtou promývačkou plyn vystupuje z pračky a vstupuje do zařízení určenému ke zhodnocení účinnosti odstranění nečistot.

Námi navržená pračka je pro náš experiment vhodná – velice jednoduchá, levná, dostupná. Pro větší provoz v praxi je tento princip pračky téměř nepoužitelný, a to zejména kvůli své vysoké tlakové ztrátě.

7.5 Výpočtová část

Jak již bylo zmíněno generovaný plyn vstupuje do pračky z fluidního zplyňovacího reaktoru a postupně prochází filtrem, mokrou pračkou a poté odběrovou trati. Předpokládaná teplota plynu při výstupu z reaktoru je 600–700 °C, ale pro správnou funkci mokré pračky je žádoucí, aby byla teplota při vstupu do filtru přibližně 300 °C. Vyšší teplota by totiž mohla způsobovat vypařování vody v první promývačce, zatímco při nižších teplotách by mohlo docházet ke kondenzaci dehtu ještě před pračkou.

Teplotu plynu lze naštěstí jednoduše ovlivnit, a to délkou přívodního potrubí vedoucího ze zplyňovacího reaktoru do filtru. Plyn do potrubí vstupuje při teplotě 600–700 °C a během prostupu trubkou se postupně ochlazuje. Čím delší bude přívodní potrubí vedoucí z reaktoru do filtru, tím chladnější plyn bude. Potrubí tedy zastává chladicí funkci. Před samotným sestavením čistící trati je tedy potřeba vypočítat délku trubky pro dosažení správné teploty při vstupu do filtru, čímž se zabývá kapitola 7.5.1.

Dalším problémem, který je před experimentem potřeba vyřešit, je případná změna teploty vody prací kapaliny během jednoho měření. Při každém měření prochází pračkou 100 l plynu o vstupní teplotě 300 °C, přičemž je nutno udržet požadovanou teplotu prací vody. Zejména při nízkých teplotách vody by mohlo docházet k výraznému nárůstu teploty prací kapaliny. O jak velké navýšení teploty se jedná se zabývá kapitola 7.5.2.

Tato výpočtová část zahrnuje poměrně velké množství menších výpočtů (různá podobnostní čísla, vlastnosti plynu apod.). V samotné diplomové práci tak je uveden pouze výpočtový postup se vzorci a hlavními mezivýsledky. Jako příloha diplomové práce ale je uveden sešit Excel, ve kterém byly prováděny všechny výpočty. Všechny použité výpočtové vztahy vychází ze dvou zdrojů [64][65]. Tabulkové hodnoty vlastností složek plynu popisují energetické tabulky [66].

7.5.1 Výpočet délky potrubí

Následující část diplomové práce se zabývá výpočtem správné délky přívodní trubky vedoucí ze zplyňovacího zařízení do filtru, ve které dochází k ochlazení plynu vlivem ztrát tepla do okolí.

Výpočet délky trubky nám znepříjemňují tři proměnné veličiny potřebné pro výpočet, a to teplota plynu na vstupu do trubky (rozmezí 600–700 °C), neznámá teplota okolí v den měření (předpokládáme rozmezí 8–30 °C) a průtok plynu (rozmezí 10–14 l·min⁻¹).

Tab. 7.1 Zadané hodnoty

D _{trubka}	[m]	0,01
d _{trubka}	[m]	0,007
t _{plyn,in}	[°C]	600–700
t _{plyn,out}	[°C]	300
t _{okolí}	[°C]	8–30

Základním předpokladem výpočtu délky L je, že plyn musí pro své ochlazení na 300 °C při průchodu trubkou odevzdat teplo Q_{plyn}.

K tomu dochází v důsledku ztrát tepla do okolí při průchodu trubkou, které vyjadřuje veličina Q_{z,potrubí}, což je ztráta tepla na jeden metr trubky. Jednoduchý podíl těchto dvou veličin pak je požadovaná délka trubky L.

$$L = \frac{Q_{plyn}}{Q_{z,potrubí}} [m] \quad \text{Rov.7.1}$$

L – délka trubky, Q_{plyn} – teplo plynu, Q_{z,potrubí} – ztráta tepla na jeden metr trubky

Výpočet vlastností plynu

Prvním krokem musí být výpočet základních vlastností plynu. Ty jsou závislé na složení a teplotě plynu. Tab. 7.2 ukazuje předpokládané složení plynu.

Tab. 7.2 Předpokládané složení generovaného plynu

CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	N ₂	C _x H _y
15	18	12	3	51	1

Protože je generovaný plyn ve skutečnosti směsí různých plynů, budeme zjišťovat základní vlastnosti jednotlivých složek plynu a poté dle procentuálního složení dopočítávat vlastnosti celé směsi plynů. Jednotlivé vlastnosti plynu jsou velice závislé na teplotě, proto je nutné zjišťovat je pro danou střední teplotu plynu.

Střední teplota plynu

Střední teplota není nic jiného, než průměr teploty plynu na vstupu a výstupu z potrubí.

$$t_{stř,potrubí} = \frac{t_{in,potrubí} + t_{out,potrubí}}{2} [°C] \quad \text{Rov.7.2}$$

t_{stř,potrubí} – střední teplota plynu v trubce, t_{in,potrubí} – teplota plynu na vstupu do trubky, t_{out,potrubí} – teplota plynu na výstupu z trubky

Požadovaná teplota na výstupu $t_{out, potrubí}$ je vždy 300 °C, u teploty na vstupu $t_{in, potrubí}$ ale počítáme s rozmezím 600–700 °C. Pro zjednodušení není potřeba provádět výpočet pro každou teplotu $t_{in, potrubí}$, ale bude stačit pět různých teplot s teplotními rozestupy 25 °C – tedy 600, 625, 650, 675 a 700 °C.

Molární hmotnost plynu

První základní charakteristikou plynu, kterou musíme vypočítat, je molární hmotnost plynu. Ta závisí na molární hmotnosti a procentuálním zastoupení jednotlivých složek a vypočítá se dle rov. 7.3.

$$M_m = \sum_{i=1}^n M_{m,i} \cdot x_{m,i} \text{ [kg} \cdot \text{mol}^{-1}] \quad \text{Rov.7.3}$$

M_m – molární hmotnost plynu, $M_{m,i}$ – molární hmotnost složky plynu, $x_{m,i}$ – hmotnostní podíl složky plynu

Měrná tepelná kapacita plynu

Další charakteristikou plynu je měrná tepelná kapacita plynu. Tu vypočítáme obdobně jako molární hmotnost – tedy z měrné tepelné kapacity a procentuálního zastoupení jednotlivých složek plynu.

$$c_p = \sum_{i=1}^n c_{p,i} \cdot x_{m,i} \text{ [J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad \text{Rov.7.4}$$

c_p – měrná tepelná kapacita plynu, $c_{p,i}$ – měrná tepelná kapacita složky plynu, $x_{m,i}$ – hmotnostní podíl složky plynu

Hustota plynu

Hustotu vypočteme ze stavové rovnice.

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T_{stř} \quad \text{Rov.7.5}$$

kde platí, že:

$$n = \frac{m}{M_m} \text{ [mol]} \quad \text{Rov.7.6}$$

$$m = \rho \cdot V \text{ [kg]} \quad \text{Rov.7.7}$$

po úpravě:

$$\rho = \frac{p \cdot M_m}{R \cdot T_{stř}} \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad \text{Rov.7.8}$$

p – tlak plynu, V – objem plynu, n – látkové množství, R – univerzální plynová konstanta, $T_{stř}$ – střední termodynamická teplota plynu, m – hmotnost plynu, M_m – molární hmotnost, ρ – hustota plynu

Dynamická viskozita plynu

S rostoucí teplotou roste také dynamická viskozita. Vzorec pro výpočet dynamické viskozity v závislosti na teplotě je následující:

$$\eta_i = \eta_0 \cdot \frac{273,15 + C}{T_{stř} + C} \cdot \left(\frac{T_{stř}}{273,15} \right)^{\frac{3}{2}} \text{ [Pa} \cdot \text{s]} \quad \text{Rov.7.9}$$

η_i – dynamická viskozita i-té složky plynu, η_0 – dynamická viskozita i-té složky plynu při 0 °C, C – Sutherlandův koeficient, $T_{stř}$ – střední termodynamická teplota

pro směs plynů pak platí:

$$\eta = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{x_{m,i}}{\eta_i}} [Pa \cdot s] \quad \text{Rov.7.10}$$

η – dynamická viskozita plynu, $x_{m,i}$ – hmotnostní podíl složky plynu, η_i – dynamická viskozita i-té složky plynu

Tepelná vodivost plynu

Další charakteristikou plynu, kterou budeme potřebovat je tepelná vodivost. V tabulkách najdeme hodnoty pro složky plynu a podle dobře známého vzorce 7.11 vypočteme tepelnou vodivost plynu.

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot x_{m,i} [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad \text{Rov.7.11}$$

λ – součinitel tepelné vodivosti plynu, λ_i – součinitel tepelné vodivosti i-té složky plynu, $x_{m,i}$ – hmotnostní podíl složky plynu

Prandtlovo číslo

Z dříve vypočítaných vlastností plynu můžeme vypočítat první z podobnostních čísel – Prandtlovo číslo. To závisí právě na dynamické viskozitě, měrné tepelné kapacitě a tepelné vodivosti.

$$Pr = \frac{v}{k} = \frac{\frac{\eta}{\rho}}{\frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}} = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} [-] \quad \text{Rov.7.12}$$

Pr – Prandtlovo číslo, v – kinematická viskozita, k – teplotní vodivost, η – dynamická viskozita, ρ – hustota, λ – součinitel tepelné vodivosti plynu, c_p – měrná tepelná kapacita

Tab. 7.3 Základní vlastnosti generovaného plynu

veličina	jednotka	$t_{stř} [^{\circ}C]$				
		450	462,5	475	487,5	500
c_p	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	2733,06	2735,86	2738,66	2741,47	2744,27
ρ	$[kg \cdot m^{-3}]$	0,46257	0,45471	0,44711	0,43976	0,43265
$\eta \cdot 10^{-5}$	$[Pa \cdot s]$	2,83905	2,87075	2,90215	2,93326	2,96410
λ	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	0,08965	0,09056	0,09147	0,09234	0,09422
Pr	$[-]$	0,66793	0,66794	0,66809	0,66868	0,66706

Hmotnostní průtok

Bylo zadáno, že objemový průtok plynu bude 10 až 14 l·min⁻¹. Pro další výpočty ale budeme potřebovat průtok hmotnostní. Ten z objemového průtoku vypočítáme pomocí rovnice 7.13.

$$Q_m = \rho \cdot Q_v [kg \cdot s^{-1}] \quad \text{Rov.7.13}$$

Q_m – hmotnostní průtok, ρ – hustota, Q_V – objemový průtok

Teplo odevzdané plynem

Nyní máme vypočteny všechny potřebné vlastnosti pro výpočet tepla, které plyn musí odevzdat během průchodu potrubím. To se vypočítá jako:

$$Q_{\text{plyn}} = c_p \cdot Q_m \cdot (t_{\text{in}} - t_{\text{out}}) \text{ [J]} \quad \text{Rov.7.14}$$

Q_{plyn} – teplo, které plyn musí odevzdat, c_p – měrná tepelná kapacita, Q_m – hmotnostní průtok, $t_{\text{in,potrubí}}$ – teplota plynu na vstupu do trubky, $t_{\text{out,potrubí}}$ – teplota plynu na výstupu z trubky

Množství tepla se bude lišit pro jednotlivé průtoky plynu a pro jednotlivé vstupní teploty.

Tab. 7.4 Teplo odevzdané plynem

Q_V	$t_{\text{plyn,in}} \text{ [}^\circ\text{C]}$				
	600	625	650	675	700
$[\text{l} \cdot \text{min}^{-1}]$	$Q_{\text{plyn}} \text{ [J]}$				
10	63,21	67,38	71,43	75,35	79,15
11	69,53	74,12	78,57	82,88	87,07
12	75,85	80,86	85,71	90,42	94,99
13	82,17	87,60	92,86	97,95	102,90
14	88,50	94,34	100,00	105,49	110,82

Výpočet tepelných ztrát trubky

Nyní musíme vypočítat ztrátu tepla $Q_{z,\text{potrubí}}$ na jeden metr trubky.

$$Q_{z,\text{potrubí}} = \frac{\Delta T_{\ln}}{R_c} \text{ [J]} \quad \text{Rov.7.15}$$

$Q_{z,\text{potrubí}}$ – tepelná ztráta, $\Delta T_{\ln}$ – střední teplotní logaritmický teplotní spád, R_c – celkový tepelný odpor

Střední logaritmický teplotní spád

Protože se teplota plynu v trubce mění, musím využít střední teplotní logaritmický spád.

$$\Delta T_{\ln} = \frac{(t_{\text{out,potrubí}} - t_{\text{ok}}) - (t_{\text{in,potrubí}} - t_{\text{ok}})}{\ln \frac{(t_{\text{out,potrubí}} - t_{\text{ok}})}{(t_{\text{in,potrubí}} - t_{\text{ok}})}} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad \text{Rov.7.16}$$

$\Delta T_{\ln}$ – střední teplotní logaritmický spád, $t_{\text{out,potrubí}}$ – teplota plynu na výstupu z trubky, t_{ok} – teplota okolí, $t_{\text{in,potrubí}}$ – teplota plynu na vstupu do trubky

Celkový tepelný odpor

Celkový tepelný odpor se vypočítá jako součet všech odporů při přestupu tepla z trubky do okolí. V našem případě je to součet tří různých odporů.

$$R_c = R_{1,\text{potrubí}} + R_{2,\text{potrubí}} + R_{3,\text{potrubí}} \text{ [m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}] \quad \text{Rov.7.17}$$

R_c – celkový tepelný odpor, $R_{1,\text{potrubí}}$ – tepelný odpor ze strany plynu, $R_{2,\text{potrubí}}$ – tepelný odpor stěny trubky, $R_{3,\text{potrubí}}$ – tepelný odpor ze strany vzduchu

Tepelný odpor ze strany plynu

$$R_{1,potrubí} = \frac{1}{\alpha_{plyn} \cdot \pi \cdot d} [m^2 \cdot K \cdot W^{-1}] \quad \text{Rov.7.18}$$

α_{plyn} – součinitel přestupu tepla plynu, d – vnitřní průměr trubky

$$\alpha_{plyn} = \frac{Nu_D \cdot \lambda}{d} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad \text{Rov.7.19}$$

Nu_D – Nusseltovo číslo, λ – součinitel tepelné vodivosti plynu, d – vnitřní průměr trubky

Hodnota Nusseltova čísla závisí na Reynoldsově čísle, které se vypočítá takto:

$$Re = \frac{4 \cdot Q_m}{\pi \cdot d \cdot \eta} [-] \quad \text{Rov.7.20}$$

Tab. 7.5 Reynoldsova čísla pro jednotlivé stavy

Q_v	$t_{stř} [^{\circ}C]$				
	450	462,5	475	487,5	500
$[l \cdot min^{-1}]$	$Re [-]$				
10	493,93	480,18	467,04	454,50	442,50
11	543,32	528,19	513,75	499,95	486,75
12	592,71	576,21	560,45	545,39	530,99
13	642,11	624,23	607,16	590,84	575,24
14	691,50	672,25	653,86	636,29	619,49

Kritickou hodnotou pro plyny je $Re_{krit} = 2320$, takže se jedná o laminární proudění. Pro plyny s $Re < Re_{krit}$ platí $Nu_D = 4,36$.

Nyní můžeme Nusseltovo číslo dosadit do rov. 7.19 a vypočítat součinitel přestupu tepla ze strany plynu α_{plyn} .

Tab. 7.6 Součinitel přestupu tepla ze strany plynu

Q_v	$t_{stř} [^{\circ}C]$				
	450	462,5	475	487,5	500
$[l \cdot min^{-1}]$	$\alpha_{plyn} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$				
10	55,84	56,41	56,97	57,51	58,69
11	55,84	56,41	56,97	57,51	58,69
12	55,84	56,41	56,97	57,51	58,69
13	55,84	56,41	56,97	57,51	58,69
14	55,84	56,41	56,97	57,51	58,69

Dle rov.7.18 pak můžeme dopočítat tepelný odpor ze strany plynu $R_{1,potrubí}$.

Tab. 7.7 Tepelný odpor ze strany plynu

Q_v	$t_{stř} [°C]$				
	450	462,5	475	487,5	500
$[l \cdot min^{-1}]$	$R_{1,potrubi} [m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$				
10	0,8144	0,8062	0,7982	0,7907	0,7748
11	0,8144	0,8062	0,7982	0,7907	0,7748
12	0,8144	0,8062	0,7982	0,7907	0,7748
13	0,8144	0,8062	0,7982	0,7907	0,7748
14	0,8144	0,8062	0,7982	0,7907	0,7748

Tepelný odpor stěny trubky

Druhým tepelným odporem je odpor stěny (pláště) trubky $R_{2,potrubi}$, který se vypočítá jako:

$$R_{2,potrubi} = \frac{\ln \frac{D}{d}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{ocel}} [m^2 \cdot K \cdot W^{-1}] \quad \text{Rov.7.21}$$

D – vnější průměr trubky, d – vnitřní průměr trubky, $\lambda_{ocel} = 15$ [67] – součinitel tepelné vodivosti dané oceli

Po dosazení do rov. 7.21 vychází odpor stěny trubky $R_{2,potrubi} = 0,00378444 [m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$.

Tepelný odpor ze strany vzduchu

Tepelný odpor vzduchu se počítá obdobně jako tepelný odpor ze strany plynu. Předchozí odpor ze strany plynu $R_{1,potrubi}$ jsme počítali pro jednotlivé průtoky plynu 10–14 $l \cdot min^{-1}$. V důsledku ale vcelku zbytečně, protože nám hodnoty odporu $R_{1,potrubi}$ pro jednotlivé průtoky vyšly shodné. Odpor ze strany vzduchu $R_{3,potrubi}$ již ale musíme počítat pro jednotlivé teploty okolí.

$$R_{3,potrubi} = \frac{1}{\alpha_{vzduch} \cdot \pi \cdot d} [m^2 \cdot K \cdot W^{-1}] \quad \text{Rov.7.22}$$

α_{vzduch} – součinitel přestupu tepla vzduchu, d – vnitřní průměr trubky

$$\alpha_{vzduch} = \frac{Nu_D \cdot \lambda_{vzduch}}{d} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad \text{Rov.7.23}$$

Nu_D – Nusseltovo číslo, λ_{vzduch} – součinitel tepelné vodivosti vzduchu, d – vnitřní průměr trubky

Pro přirozenou konvekci platí výpočet Nusseltova čísla dle rov. 7.24.

$$Nu_D = \left(0,6 + \frac{0,387 \cdot (GrPr)^{1/6}}{\left(1 + 0,721 \cdot \left(\frac{1}{Pr} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2 [-] \quad \text{Rov.7.24}$$

Gr – Grasshofovo číslo, Pr – Prandtlovo číslo

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (t_{stř} - t_{ok}) \cdot D^3}{\nu^2} [-] \quad \text{Rov.7.25}$$

g – tíhové zrychlení, β – součinitel objemové roztažnosti, $t_{stř}$ – střední teplota plynu, t_{ok} – teplota okolí, D – vnější průměr trubky, ν – kinematická viskozita

Určovací teplota

V předchozích vzorcích musíme zjistit součinitel tepelné vodivosti vzduchu λ_{vzduch} , kinematickou viskozitu ν , Prandtlovo číslo Pr a součinitel objemové roztažnosti β . Všechny tyto veličiny se určují pro tzv. určovací teplotu $t_{urč}$.

$$t_{urč} = \frac{t_{stř, potrubí} - t_{ok}}{2} \quad \text{Rov.7.26}$$

Rozmezí určovacích teplot pro všechny stavy je 36 °C. Protože je to zanedbatelné rozmezí, stačí nám určit vlastnosti vzduchu pro 250 °C, což je téměř průměrná určovací teplota.

$$\lambda_{vzduch, 250\text{ °C}} = 0,0398 [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$\nu_{vzduch, 250\text{ °C}} = 4,204 \cdot 10^{-5} [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$Pr_{vzduch, 250\text{ °C}} = 0,727 [-]$$

$$\beta_{vzduch, 250\text{ °C}} = \frac{1}{(t_{urč} + 273,15)} = \frac{1}{520,15} = 1,923 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

$\lambda_{vzduch, 250\text{ °C}}$ – součinitel tepelné vodivosti vzduchu při 250 °C, $\nu_{vzduch, 250\text{ °C}}$ – kinematická viskozita vzduchu při 250 °C, $Pr_{vzduch, 250\text{ °C}}$ – Prandtlovo číslo vzduchu při 250 °C, $\beta_{vzduch, 250\text{ °C}}$ – součinitel objemové roztažnosti vzduchu při 250 °C

Nyní známe všechny hodnoty pro výpočet Grashofových čísel dle rov. 7.25. Dle rov. 7.24 dopočítáme Nusseltova čísla a dále z rov. 7.23 vypočítáme součinitel přestupu tepla vzduchu α_{vzduch} .

Tab. 7.8 Součinitel přestupu tepla ze strany vzduchu

$t_{okolí}$	$t_{stř} [\text{°C}]$				
	450	462,5	475	487,5	500
$[\text{°C}]$	$\alpha_{vzduch} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$				
8	13,73	13,78	13,82	13,87	13,91
10	13,71	13,76	13,80	13,85	13,89
15	13,66	13,71	13,75	13,80	13,85
20	13,61	13,66	13,71	13,75	13,80
25	13,56	13,61	13,66	13,71	13,75
30	13,51	13,56	13,61	13,66	13,70

Součinitele přestupu tepla poté dosadíme do rov. 7.22 a vypočítáme tak výsledný tepelný odpor ze strany vzduchu.

Tab. 7.9 Tepelný odpor ze strany vzduchu

$t_{\text{okolí}}$	$t_{\text{stř}} [^{\circ}\text{C}]$				
	450	462,5	475	487,5	500
$[^{\circ}\text{C}]$	$R_{3,\text{potrubí}} [\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}]$				
8	2,3186	2,3105	2,3027	2,2953	2,2881
10	2,3220	2,3138	2,3060	2,2985	2,2912
15	2,3306	2,3222	2,3142	2,3064	2,2990
20	2,3393	2,3307	2,3224	2,3145	2,3068
25	2,3481	2,3392	2,3307	2,3226	2,3147
30	2,3569	2,3478	2,3391	2,3307	2,3227

Nyní máme vypočteny všechny tepelné odpory, jejich součtem můžeme vypočítat celkový tepelný odpor. Nutno podotknout, že odpor $R_{1,\text{potrubí}}$ je závislý pouze na střední teplotě plynu, $R_{2,\text{potrubí}}$ zůstává konstantní (počítáme s konstantním λ_{ocel}) a $R_{3,\text{potrubí}}$ je závislý na střední teplotě plynu i teplotě okolí.

Tab. 7.10 Celkový tepelný odpor trubky

$t_{\text{okolí}}$	$t_{\text{stř}} [^{\circ}\text{C}]$				
	450	462,5	475	487,5	500
$[^{\circ}\text{C}]$	$R_c [\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}]$				
8	3,1368	3,1205	3,1047	3,0897	3,0668
10	3,1402	3,1238	3,1079	3,0929	3,0699
15	3,1488	3,1322	3,1161	3,1009	3,0776
20	3,1575	3,1406	3,1243	3,1089	3,0855
25	3,1663	3,1492	3,1326	3,1170	3,0934
30	3,1751	3,1578	3,1410	3,1252	3,1014

Po dosazení do rov. 7.15 vypočítáme tepelné ztráty na jeden metr trubky $Q_{z,\text{potrubí}}$.

Tab. 7.11 Tepelné ztráty na metr trubky

$t_{\text{okolí}}$	$t_{\text{stř}} [^{\circ}\text{C}]$				
	450	462,5	475	487,5	500
$[^{\circ}\text{C}]$	$Q_{z,\text{potrubí}} [\text{J}]$				
8	135,32	139,22	143,09	146,93	151,17
10	134,51	138,40	142,27	146,10	150,32
15	132,49	136,35	140,20	144,01	148,21
20	130,47	134,32	138,14	141,93	146,11
25	128,46	132,28	136,09	139,86	144,01
30	126,45	130,26	134,04	137,79	141,91

Délka potrubí

Nyní máme vypočteno množství tepla Q_{plyn} , které plyn musí odevzdat. Také známe tepelnou ztrátu na jeden metr trubky - $Q_{\text{z,pračka}}$. Jednoduchým podílem těchto veličin vypočítáme potřebnou délku potrubí.

$$L = \frac{Q_{\text{plyn}}}{Q_{\text{z,pračka}}} \text{ [m]} \quad \text{Rov.7.27}$$

Tab. 7.12 Délka potrubí pro jednotlivé teploty plynu a okolí pro průtok $10 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$

$t_{\text{okolí}}$	$t_{\text{stř}} \text{ [}^{\circ}\text{C]}$				
	450	462,5	475	487,5	500
$\text{[}^{\circ}\text{C]}$	$L \text{ [m]}$				
8	0,4671	0,4840	0,4992	0,5128	0,5236
10	0,4699	0,4869	0,5021	0,5158	0,5266
15	0,4771	0,4942	0,5095	0,5232	0,5341
20	0,4845	0,5017	0,5171	0,5309	0,5418
25	0,4921	0,5094	0,5249	0,5388	0,5497
30	0,4999	0,5173	0,5329	0,5468	0,5578

Tab. 7.13 Délka potrubí pro jednotlivé teploty plynu a okolí pro průtok $11 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$

$t_{\text{okolí}}$	$t_{\text{stř}} \text{ [}^{\circ}\text{C]}$				
	450	462,5	475	487,5	500
$\text{[}^{\circ}\text{C]}$	$L \text{ [m]}$				
8	0,5138	0,5324	0,5491	0,5641	0,5760
10	0,5169	0,5356	0,5523	0,5673	0,5792
15	0,5248	0,5436	0,5604	0,5755	0,5875
20	0,5329	0,5519	0,5688	0,5840	0,5959
25	0,5413	0,5603	0,5773	0,5926	0,6046
30	0,5499	0,5691	0,5862	0,6015	0,6136

Tab. 7.14 Délka potrubí pro jednotlivé teploty plynu a okolí pro průtok $12 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$

$t_{\text{okolí}}$	$t_{\text{stř}} [^{\circ}\text{C}]$				
	450	462,5	475	487,5	500
$[^{\circ}\text{C}]$	$L [\text{m}]$				
8	0,5605	0,5808	0,5990	0,6154	0,6284
10	0,5639	0,5843	0,6025	0,6189	0,6319
15	0,5725	0,5930	0,6114	0,6279	0,6409
20	0,5814	0,6020	0,6205	0,6371	0,6501
25	0,5905	0,6113	0,6298	0,6465	0,6596
30	0,5999	0,6208	0,6395	0,6562	0,6693

Tab. 7.15 Délka potrubí pro jednotlivé teploty plynu a okolí pro průtok $13 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$

$t_{\text{okolí}}$	$t_{\text{stř}} [^{\circ}\text{C}]$				
	450	462,5	475	487,5	500
$[^{\circ}\text{C}]$	$L [\text{m}]$				
8	0,6073	0,6292	0,6489	0,6667	0,6807
10	0,6109	0,6330	0,6527	0,6705	0,6845
15	0,6203	0,6424	0,6623	0,6802	0,6943
20	0,6298	0,6522	0,6722	0,6901	0,7043
25	0,6397	0,6622	0,6823	0,7004	0,7146
30	0,6499	0,6725	0,6927	0,7109	0,7251

Tab. 7.16 Délka potrubí pro jednotlivé teploty plynu a okolí pro průtok $14 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$

$t_{\text{okolí}}$	$t_{\text{stř}} [^{\circ}\text{C}]$				
	450	462,5	475	487,5	500
$[^{\circ}\text{C}]$	$L [\text{m}]$				
8	0,6540	0,6776	0,6988	0,7180	0,7331
10	0,6579	0,6816	0,7029	0,7221	0,7372
15	0,6680	0,6919	0,7133	0,7325	0,7477
20	0,6783	0,7024	0,7239	0,7432	0,7585
25	0,6889	0,7132	0,7348	0,7543	0,7695
30	0,6998	0,7242	0,7460	0,7656	0,7809

Teoretická délka trubky pro ochlazení plynu na 300°C se v důsledku různých průtoků, teplot plynu na vstupu do trubky a teplot okolí pohybuje v rozmezí 46 až 78 cm. Trubka sloužící pro odběr plynu by tedy měla být v tomto délkovém rozmezí v závislosti na teplotě vzduchu v den měření a průtoku plynu.

7.5.2 Výpočet změny teploty prací kapaliny

Jeden vzorek plynu obsahuje 100 l plynu o teplotě 300 °C, který bude procházet pračkou s vodou, jejíž teplota by měla v průběhu čištění jednoho vzorku zůstat konstantní. Při nízké teplotě prací kapaliny by tak mohlo dojít k výraznému ohřívání vody a znehodnocení výsledků měření. Následující kapitola je určena právě k tomu, aby zjistila k jak výrazným změnám teploty bude v průběhu měření docházet.

Při výpočtu předpokládáme, že plyn předá všechno své teplo vodě a z pračky bude vystupovat při stejné teplotě, jakou má voda v pračce.

Základním předpokladem výpočtu konečné teploty je rovnováha mezi teplem dodaným do nádrže a teplem odevzdaným nádrží.

$$Q_{\text{plyn}} = Q_{\text{voda}} + Q_{\text{z,pračka}} \quad \text{Rov.7.28}$$

$$c_{p,\text{plyn}} \cdot m_{\text{plyn}} \cdot (t_{\text{in,pračka}} - t_{\text{konečná}}) = c_{p,\text{voda}} \cdot m_{\text{voda}} \cdot (t_{\text{konečná}} - t_{\text{voda}}) + Q_{\text{z,pračka}}$$

$$\text{Rov.7.29}$$

$$t_{\text{konečná}} = \frac{c_{p,\text{voda}} \cdot m_{\text{voda}} \cdot t_{\text{voda}} + c_{p,\text{plyn}} \cdot m_{\text{plyn}} \cdot t_{\text{in}} - Q_{\text{z,pračka}}}{c_{p,\text{voda}} \cdot m_{\text{voda}} + c_{p,\text{plyn}} \cdot m_{\text{plyn}}} \quad \text{Rov.7.30}$$

Q_{plyn} – teplo, které plyn odevzdává pračce, Q_{voda} – teplo odevzdané vodě, $Q_{\text{z,pračka}}$ – ztráty do okolí, $c_{p,\text{plyn}}$ – měrná tepelná kapacita plynu, m_{plyn} – hmotnost čištěného plynu, $t_{\text{in,pračka}}$ – teplota plynu na vstupu do pračky, $t_{\text{konečná}}$ – konečná teplota plynu pro pročištění jednoho vzorku plynu, $c_{p,\text{voda}}$ – měrná tepelná kapacita vody, m_{voda} – množství vody, t_{voda} – teplota prací kapaliny

Známé parametry

Tab.7.17 popisuje všechny známé veličiny týkající se mokré pračky, ze kterých se bude vycházet v dalších výpočtech.

Tab. 7.17 Známé hodnoty

Nádrž	a	[m]	0,75
	b	[m]	0,15
	c	[m]	0,45
	δ_{sklo}	[m]	0,006
	λ_{sklo}	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	0,76
Izolace	δ_{ps}	[m]	0,03
	λ_{ps}	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	0,04
Voda	$t_{\text{voda,max}}$	[°C]	80
	$t_{\text{voda,min}}$	[°C]	4
Plyn	$t_{\text{in,pračka}}$	[°C]	300
	$t_{\text{out,pračka}}$	[°C]	4 až 80

Výpočet vlastností plynu

Střední teplota plynu

Podobně jako u výpočtu délky trubky budeme potřebovat střední teplotu plynu. Předpokládáme, že plyn uvnitř pračky předá všechno své teplo vodě a výstupní teplota plynu $t_{out,pračka}$ bude rovna teplotě vody v pračce $t_{voda,pračka}$.

$$t_{stř,pračka} = \frac{t_{in,pračka} + t_{out,pračka}}{2} [^{\circ}\text{C}] \quad \text{Rov.7.31}$$

$t_{stř,pračka}$ – střední teplota plynu, $t_{in,pračka}$ – teplota plynu na vstupu do pračky, $t_{out,pračka}$ – teplota plynu na výstupu z pračky

Je důležité si uvědomit, že střední teplota plynu v pračce bude nižší než střední teplota plynu v potrubí.

Měrná tepelná kapacita plynu

Další potřebnou vlastností plynu je tepelná kapacita.

$$c_p = \sum_{i=1}^n c_{p,i} \cdot x_{m,i} [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad \text{Rov.7.32}$$

c_p – měrná tepelná kapacita plynu, $c_{p,i}$ – měrná tepelná kapacita složky plynu, $x_{m,i}$ – hmotnostní podíl složky plynu

Hustota plynu

Hustotu vypočteme opět ze stavové rovnice.

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T_{stř,pračka} \quad \text{Rov.7.33}$$

p – tlak plynu, V – objem plynu, n – látkové množství, R – univerzální plynová konstanta, $T_{stř,pračka}$ – střední teplota plynu v pračce

kde platí, že:

$$n = \frac{m}{M_m} [mol] \quad \text{Rov.7.34}$$

m – hmotnost plynu, M_m – molární hmotnost

$$m = \rho \cdot V [kg] \quad \text{Rov.7.35}$$

ρ – hustota plynu, V – objem plynu

po úpravě:

$$\rho = \frac{p \cdot M_m}{R \cdot T_{stř,pračka}} [kg \cdot m^{-3}] \quad \text{Rov.7.36}$$

Tab. 7.18 Měrná tepelná kapacita a hustota plynu při vstupu do pračky

veličina	jednotka	$t_{stř} [^{\circ}\text{C}]$				
		152	160	170	180	190
c_p	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	2665,18	2667,26	2669,87	2672,48	2675,09
ρ	$[kg \cdot m^{-3}]$	0,78680	0,77227	0,75484	0,73818	0,72224

Hmotnostní průtok

Objemový průtok převedeme na hmotnostní průtok.

$$Q_m = \rho \cdot Q_V [kg \cdot s^{-1}]$$

Rov.7.37

Q_m – hmotnostní průtok, ρ – hustota, Q_V – objemový průtok

Teplo odevzdané plynem

Nyní jsme schopni vypočítat teplo Q_{plyn} , které musí plyn odevzdat během průchodu pračkou, aby došlo k jeho ochlazení.

$$Q_{plyn} = c_p \cdot Q_m \cdot (t_{in,pračka} - t_{out,pračka}) [J]$$

Rov.7.38

Q_{plyn} – teplo, které plyn musí odevzdat, c_p – měrná tepelná kapacita, Q_m – hmotnostní průtok, $t_{in,pračka}$ – teplota plynu na vstupu do trubky, $t_{out,pračka}$ – teplota plynu na výstupu z trubky

Tab. 7.19 Teplo obsažené v plynu

Q_v	Teplota vody [°C]								
	4	10	20	30	40	50	60	70	80
[l·min ⁻¹]	$Q_{plyn} [J]$								
10	103,4	100,7	96,1	91,7	87,3	83,1	78,9	74,8	70,8
11	113,8	110,7	105,7	100,8	96,1	91,4	86,8	82,3	77,9
12	124,1	120,8	115,4	110,0	104,8	99,7	94,7	89,8	85,0
13	134,5	130,9	125,0	119,2	113,5	108,0	102,6	97,3	92,1
14	144,8	140,9	134,6	128,4	122,3	116,3	110,5	104,8	99,2

Výpočet tepelných ztrát nádrže

Tepelná ztráta pračky $Q_{z,pračka}$ se opět vypočítá jako podíl rozdílů teplot a celkového tepelného odporu.

$$Q_{z,pračka} = \frac{\Delta T}{R_c} [J \cdot m^{-1}]$$

$Q_{z,pračka}$ – tepelná ztráta v pračce, ΔT – rozdíl teplot vody a okolí, R_c – celkový tepelný odpor

Tepelné odpory

U trubky jsme celkový tepelný odpor R_c počítali jako součet tepelného odporu ze strany plynu, odporu stěny trubky a odporu ze strany vzduchu, kde výsledek byla ztráta tepla na metr trubky. Pro mokrou pračku musíme vypočítat tepelné ztráty pro každou stěnu nádrže, kde jejich součet bude tvořit celkovou tepelnou ztrátu.

$$R_c = \sum_{i=1}^6 R_{c,i} [m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$$

Rov.7.39

R_c – celkový tepelný odpor nádrže, $R_{c,i}$ – tepelný odpor i-té stěny

Tepelný odpor jedné stěny se ale vypočítá podobně jako u trubky, a to jako součet jednotlivých tepelných odporů dané stěny. Oproti trubce zde máme navíc odpor polystyrenovou izolací.

$$R_{c,i} = R_{1,i} + R_{2,i} + R_{3,i} + R_{4,i}$$

Rov.7.40

$R_{1,i}$ – odpor ze strany vody v nádrži pro danou stěnu, $R_{2,i}$ – odpor skleněnou stěnou nádrže pro danou stěnu, $R_{3,i}$ – odpor polystyrenovou izolací pro danou stěnu, $R_{4,i}$ – odpor ze strany vzduchu pro danou stěnu

Určovací teplota

Opět musíme určit některé vlastnosti vzduchu – součinitel tepelné vodivosti vzduchu λ_{vzduch} , kinematickou viskozitu ν , Prandtlovo číslo Pr a součinitel objemové roztažnosti β . Všechny tyto vlastnosti jsou závislé na teplotě. Určujeme je pro tzv. určovací teplotu.

$$t_{urč} = \frac{t_{stř,pračka} - t_{ok}}{2} \quad \text{Rov.7.41}$$

Rozmezí určovacích teplot pro všechny stavy je 49 °C. Opět je to poměrně zanedbatelné rozmezí a stačí nám tak určit vlastnosti vzduchu pro průměr určovací teploty (30 °C).

$$\lambda_{vzduch,30\text{ °C}} = 0,0259 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$\nu_{vzduch,30\text{ °C}} = 1,63 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$Pr_{vzduch,30\text{ °C}} = 0,727 \text{ [-]}$$

$$\beta_{vzduch,30\text{ °C}} = \frac{1}{(t_{urč} + 273,15)} = \frac{1}{300,15} = 3,33 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$\lambda_{vzduch,30\text{ °C}}$ – součinitel tepelné vodivosti vzduchu při 30 °C, $\nu_{vzduch,30\text{ °C}}$ – kinematická viskozita vzduchu při 30 °C, $Pr_{vzduch,30\text{ °C}}$ – Prandtlovo číslo vzduchu při 30 °C, $\beta_{vzduch,30\text{ °C}}$ – součinitel objemové roztažnosti vzduchu při 30 °C

Tepelný odpor ze strany vzduchu pro boční stěny

Začneme výpočtem odporu ze strany vzduchu R_4 .

$$R_4 = \frac{1}{\alpha_{vzduch} \cdot S} \text{ [m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}] \quad \text{Rov.7.42}$$

α_{vzduch} – součinitel přestupu tepla plyn, S – plocha boční stěny

$$\alpha_{vzduch} = \frac{Nu \cdot \lambda_{vzduch}}{d} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad \text{Rov.7.42}$$

Nu – Nusseltovo číslo, λ_{vzduch} – součinitel tepelné vodivosti vzduchu, d – charakteristický rozměr

Vzorec pro výpočet Nusseltova čísla volíme podle toho, jestli se jedná o vertikální nebo horizontální stěny a dle hodnoty Rayleighova čísla, což je součin Grasshofova a Prandtlova čísla.

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad \text{Rov.7.43}$$

Pro boční stěny:

$$Nu = 0,59 \cdot Ra^{1/4} \text{ pro } 10^4 < Ra < 10^9 \quad \text{Rov.7.44}$$

$$Nu = 0,1 \cdot Ra^{1/3} \text{ pro } 10^9 < Ra < 10^{13} \quad \text{Rov.7.45}$$

Pro horizontální stěny

$$Nu = 0,54 \cdot Ra^{1/4} \text{ pro } 10^4 < Ra < 10^7 \quad \text{Rov.7.46}$$

$$Nu = 0,15 \cdot Ra^{1/3} \text{ pro } 10^7 < Ra < 10^{11} \quad \text{Rov.7.47}$$

Ra – Rayleighovo číslo

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (t_{voda} - t_{ok}) \cdot l_{ch}^3}{\nu^2} \quad \text{Rov.7.48}$$

g – tíhové zrychlení, β – součinitel objemové roztažnosti, t_{voda} – teplota vody v nádrži, t_{ok} – teplota okolí, l_{ch} – charakteristický rozměr, ν – kinematická viskozita

Charakteristický rozměr je podíl obsahu stěny k obvodu stěny.

$$l_{ch} = \frac{S}{o} \quad \text{Rov.7.49}$$

S – obsah stěny, o – obvod stěny

Nyní jsme schopni podle předchozích rovnic vypočítat odpory ze strany vzduchu R_4 pro jednotlivé stěny. V tabulkách vypočítaných odporů si můžete všimnout prázdných políček. Ty jsou způsobeny tím, že teplota vody a teplota okolí jsou shodné a k přestupu tepla tak nedochází.

Tab. 7.20 Tepelný odpor ze strany vzduchu pro boční stěnu 0,75×0,45 m

t_{okoli}	$t_{vody} [^{\circ}C]$								
	4	10	20	30	40	50	60	70	80
$[^{\circ}C]$	R_4 pro boční stěnu 0,75×0,45								
8	0,2686	0,3203	0,2055	0,1774	0,1622	0,1522	0,1449	0,1392	0,1346
10	0,2429	—	0,2153	0,1818	0,1650	0,1542	0,1464	0,1405	0,1357
15	0,2092	0,2555	0,2566	0,1958	0,1731	0,1598	0,1506	0,1438	0,1385
20	0,1909	0,2153	—	0,2172	0,1834	0,1664	0,1554	0,1476	0,1416
25	0,1788	0,1950	0,2577	0,2588	0,1974	0,1745	0,1610	0,1518	0,1450
30	0,1699	0,1818	0,2172	—	0,2190	0,1849	0,1677	0,1567	0,1487

Tab. 7.21 Tepelný odpor ze strany vzduchu pro boční stěnu 0,45×0,15 m

t_{okoli}	$t_{vody} [^{\circ}C]$								
	4	10	20	30	40	50	60	70	80
$[^{\circ}C]$	R_4 pro boční stěnu 0,45×0,15								
8	0,2136	0,2547	0,1635	0,1411	0,1290	0,1210	0,1152	0,1107	0,1071
10	0,1932	—	0,1712	0,1446	0,1312	0,1226	0,1164	0,1117	0,1079
15	0,1664	0,2032	0,2041	0,1557	0,1376	0,1270	0,1198	0,1144	0,1101
20	0,1518	0,1712	—	0,1727	0,1458	0,1323	0,1236	0,1174	0,1126
25	0,1422	0,1551	0,2049	0,2058	0,1570	0,1388	0,1281	0,1207	0,1153
30	0,1351	0,1446	0,1727	—	0,1741	0,1470	0,1334	0,1246	0,1183

Tab. 7.22 Tepelný odpor ze strany vzduchu pro boční stěnu 0,75×0,15 m

$t_{\text{okolí}}$	$t_{\text{vody}} [^{\circ}\text{C}]$								
	4	10	20	30	40	50	60	70	80
$[^{\circ}\text{C}]$	R_4 pro dno a hladinu 0,75×0,15								
8	0,6790	0,8585	0,4752	0,3905	0,3466	0,3184	0,2981	0,2827	0,2703
10	0,5939	—	0,5056	0,4036	0,3546	0,3239	0,3024	0,2861	0,2732
15	0,4866	0,6352	0,6388	0,4455	0,3778	0,3396	0,3140	0,2953	0,2807
20	0,4308	0,5056	—	0,5114	0,4081	0,3585	0,3275	0,3056	0,2891
25	0,3946	0,4430	0,6425	0,6461	0,4504	0,3820	0,3433	0,3173	0,2984
30	0,3685	0,4036	0,5114	—	0,5170	0,4126	0,3623	0,3309	0,3088

Tepelný odpor ze strany vody

Obdobně vypočítáme také odpor ze strany vody. Vypočtené výsledky jsou v následujících tabulkách.

Tab. 7.23 Tepelný odpor ze strany vody pro boční stěnu 0,75×0,45 m

$t_{\text{okolí}}$	$t_{\text{vody}} [^{\circ}\text{C}]$								
	4	10	20	30	40	50	60	70	80
$[^{\circ}\text{C}]$	R_1 pro boční stěnu 0,75×0,45								
8	0,0045	0,0057	0,0031	0,0026	0,0023	0,0021	0,0020	0,0019	0,0018
10	0,0039	—	0,0033	0,0027	0,0023	0,0021	0,0020	0,0019	0,0018
15	0,0032	0,0042	0,0042	0,0029	0,0025	0,0022	0,0021	0,0019	0,0019
20	0,0028	0,0033	—	0,0034	0,0027	0,0024	0,0022	0,0020	0,0019
25	0,0026	0,0029	0,0042	0,0043	0,0030	0,0025	0,0023	0,0021	0,0020
30	0,0024	0,0027	0,0034	—	0,0034	0,0027	0,0024	0,0022	0,0020

Tab. 7.24 Tepelný odpor ze strany vody pro boční stěnu 0,45×0,15 m

$t_{\text{okolí}}$	$t_{\text{vody}} [^{\circ}\text{C}]$								
	4	10	20	30	40	50	60	70	80
$[^{\circ}\text{C}]$	R_1 pro boční stěnu 0,45×0,15								
8	0,0038	0,0045	0,0029	0,0025	0,0023	0,0021	0,0020	0,0020	0,0019
10	0,0034	—	0,0030	0,0026	0,0023	0,0022	0,0021	0,0020	0,0019
15	0,0029	0,0036	0,0036	0,0027	0,0024	0,0022	0,0021	0,0020	0,0019
20	0,0027	0,0030	—	0,0030	0,0026	0,0023	0,0022	0,0021	0,0020
25	0,0025	0,0027	0,0036	0,0036	0,0028	0,0024	0,0023	0,0021	0,0020
30	0,0024	0,0026	0,0030	—	0,0031	0,0026	0,0024	0,0022	0,0021

Tab. 7.25 Tepelný odpor ze strany vody pro boční stěnu 0,75×0,15 m

$t_{\text{okolí}}$	$t_{\text{vody}} [^{\circ}\text{C}]$								
	4	10	20	30	40	50	60	70	80
$[^{\circ}\text{C}]$	R_1 pro dno a hladinu 0,75×0,15								
8	0,0090	0,0113	0,0063	0,0052	0,0046	0,0042	0,0039	0,0037	0,0036
10	0,0078	—	0,0067	0,0053	0,0047	0,0043	0,0040	0,0038	0,0036
15	0,0064	0,0084	0,0084	0,0059	0,0050	0,0045	0,0041	0,0039	0,0037
20	0,0057	0,0067	—	0,0068	0,0054	0,0047	0,0043	0,0040	0,0038
25	0,0052	0,0059	0,0085	0,0085	0,0059	0,0050	0,0045	0,0042	0,0039
30	0,0049	0,0053	0,0068	—	0,0068	0,0054	0,0048	0,0044	0,0041

Tepelný odpor skleněné stěny

Kromě odporů ze strany vzduchu a vody musíme počítat s tepelnými odpory skleněných stěn a polystyrenových izolací. Ty se vypočítají dle následující rovnice:

$$R_2 = \frac{\delta_{\text{sklo}}}{\lambda_{\text{sklo}} \cdot S} [m^2 \cdot K \cdot W^{-1}] \quad \text{Rov.7.50}$$

R_2 – tepelný odpor skla, δ_{sklo} – tloušťka skla, λ_{sklo} – součinitel tepelné vodivosti skla, S – obsah stěny

Tepelný odpor polystyrenové izolace

$$R_3 = \frac{\delta_{\text{ps}}}{\lambda_{\text{ps}} \cdot S} [m^2 \cdot K \cdot W^{-1}] \quad \text{Rov.7.51}$$

R_3 – tepelný odpor polystyrenové izolace, δ_{ps} – tloušťka polystyrenové izolace, λ_{ps} – součinitel tepelné vodivosti polystyrenové izolace, S – obsah stěny

Tab. 7.26 Tepelné odpory skleněné stěny a polystyrenové izolace

Rozměry stěny	R_2	R_3
[m]	$[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$	$[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$
0,75×0,45	0,0234	2,2222
0,45×0,15	0,1170	11,1111
0,75×0,15	0,0702	6,6667

Protože nyní už máme zjištěny všechny tepelné odpory R_{1-4} , můžeme dosadit do rovnice 7.40 a vypočítat tepelné ztráty každé ze stěn, stropu a hladiny. Protože hladina je nekrytá (není zde skleněná stěna ani izolace), celkový tepelný odpor R_c pro hladinu bude součtem pouze tepelného odporu ze strany vzduchu R_4 a odporu ze strany vody R_1 .

Celková ztráta tepla nádrže je sumou ztrát všech stěn.

$$Q_z = \sum_{i=1}^n Q_{z_i} [J] \quad \text{Rov.7.52}$$

Nesmíme však zapomenout, že ztráty v tab.7.20 až 7.25 jsou vždy počítány pro jednu stěnu. Ztráty pro boční stěny tak musíme započítat dvakrát, protože dvě protější boční stěny jsou shodné. Tab.7.27 uvádí celkové tepelné ztráty pro jednotlivé teplotní stavy.

Tab. 7.27 Celková tepelná ztráta mokré pračky

$t_{\text{okolí}}$	$t_{\text{vody}} [^{\circ}\text{C}]$								
	4	10	20	30	40	50	60	70	80
$[^{\circ}\text{C}]$	$Q_z [\text{J}]$								
8	-10,23	4,47	38,47	80,69	127,82	178,56	232,18	288,21	346,28
10	-16,65	—	30,77	71,68	117,88	167,89	220,89	276,38	333,98
15	-34,71	-13,31	13,27	50,23	93,86	141,90	193,27	247,36	303,72
20	-54,82	-30,77	—	30,54	71,13	116,95	166,55	219,14	274,19
25	-76,47	-50,42	-13,22	13,17	49,85	93,14	140,79	191,76	245,43
30	-99,37	-71,68	-30,54	—	30,32	70,59	116,06	165,28	217,46

Kladné hodnoty ztrát Q_z znamená, že teplo odchází z pračky do okolí. Záporné hodnoty naopak znázorňují přestup tepla z okolí do pračky.

Konečná teplota

Nyní máme vypočítané všechny potřebné veličiny pro výpočet konečné teploty vody $t_{\text{konečná}}$ v pračce.

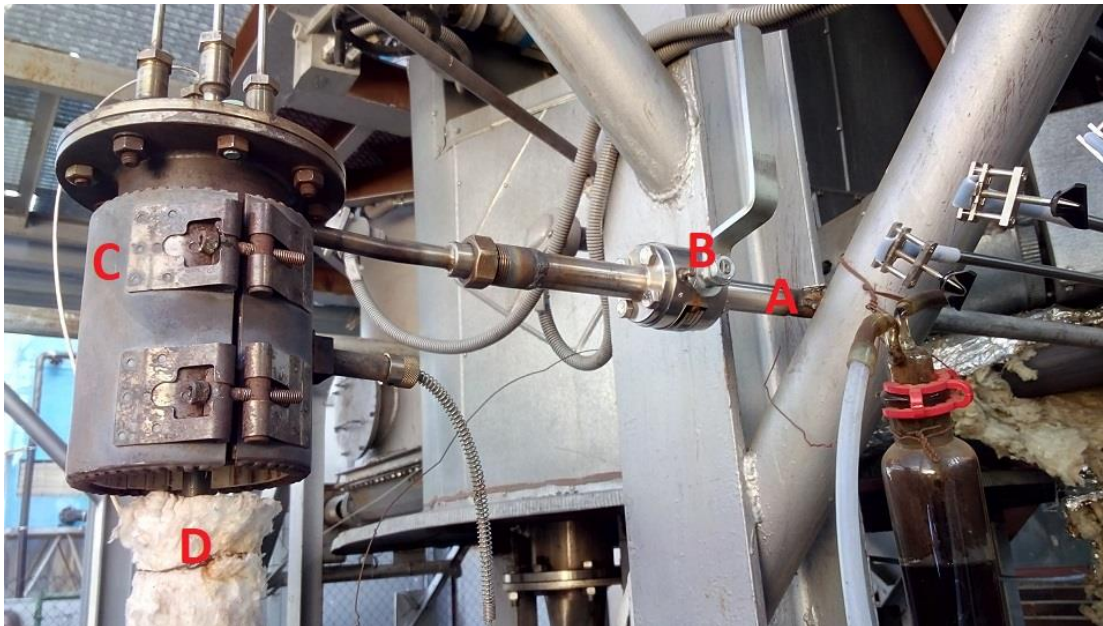
Tab. 7.28 Konečná teplota vody v mokré pračce

$t_{\text{okolí}}$	$t_{\text{vody}} [^{\circ}\text{C}]$								
	4	10	20	30	40	50	60	70	80
$[^{\circ}\text{C}]$	$t_{\text{konečná}} [^{\circ}\text{C}]$								
8	4,2177	10,2140	20,2073	30,2003	40,1934	50,1863	60,1793	70,1723	80,1652
10	4,2177	—	20,2073	30,2004	40,1934	50,1864	60,1794	70,1723	80,1652
15	4,2178	10,2141	20,2074	30,2005	40,1935	50,1865	60,1795	70,1725	80,1654
20	4,2179	10,2142	—	30,2006	40,1936	50,1866	60,1796	70,1726	80,1655
25	4,2180	10,2143	20,2075	30,2007	40,1937	50,1867	60,1798	70,1727	80,1657
30	4,2181	10,2144	20,2076	—	40,1938	50,1869	60,1799	70,1729	80,1658

Z tabulky můžeme vidět, že teplota vody v mokré pračce se po průchodu generovaného plynu mění jen minimálně. Také můžeme vidět, že voda s nižší počáteční teplotou se ohřeje o něco více, než voda s vyšší počáteční teplotou a současně se voda v pračce ohřívá více při vyšší teplotě okolí. Celkově ale můžeme říct, že při čištění jednoho vzorku plynu o objemu 100 l můžeme změnu teploty vody v pračce zanedbávat.

7.5.3 Úpravy trati před měřením kvůli výpočtové části

Dle výpočtové části by měla být délka přívodního potrubí v závislosti na podmínkách mezi 46 až 78 cm. Kvůli problémům s umístěním ale nebylo možno použít takto krátkou přívodní trubku. Skutečná trubka vedoucí od zplyňovacího reaktoru k filtru měřila 90 cm.



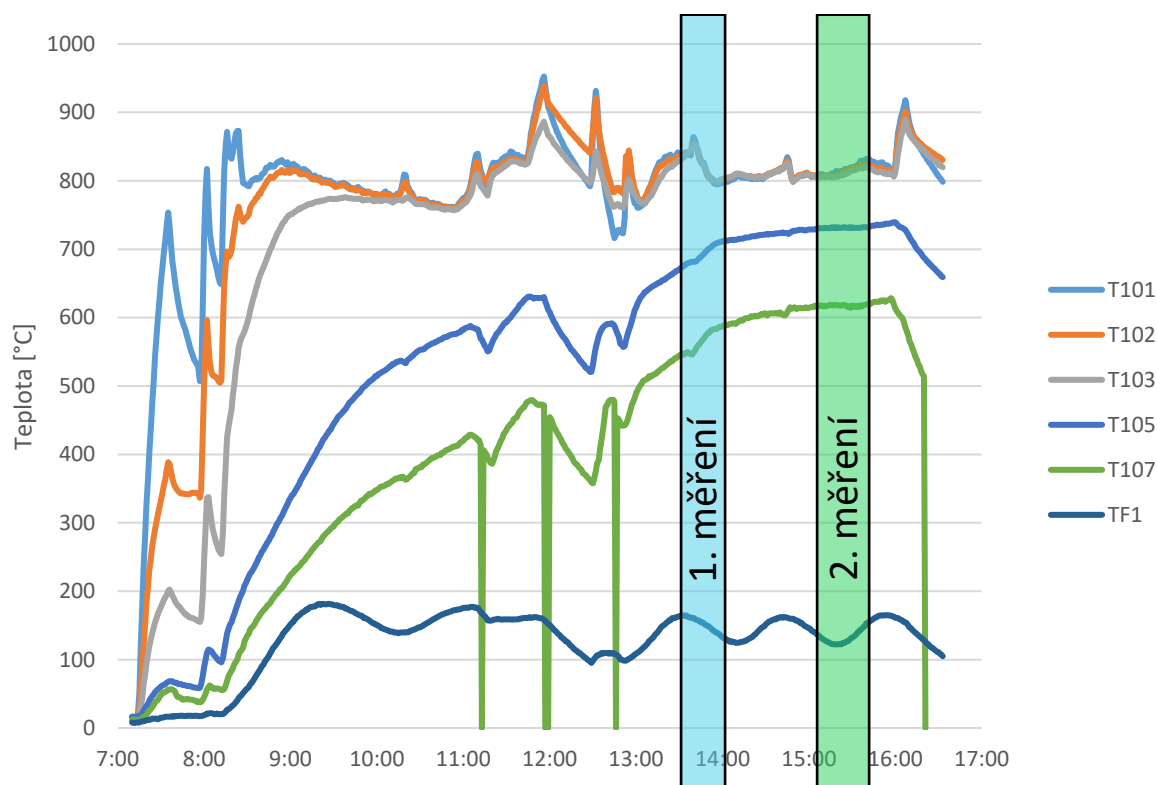
Obr. 7.8 Provedení odběru plynu ze zplyňovacího zařízení: A – přívodní potrubí, B – ventil, C – filtr tuhých nečistot, D – výstup plynu z filtru

Dle druhé části výpočtů by se teplota vody v pračce v průběhu měření neměla nijak výrazně měnit. Žádná opatření týkajícího se chlazení prací vody tak nejsou nutná. V průběhu měření bychom ale měli kontrolovat, zda opravdu nedochází k výraznějším změnám teploty.

7.6 Průběh experimentální části

Samotné měření probíhalo ve dvou dnech vždy od cca 6:00, kdy začínaly přípravy k zapálení zplyňovacího reaktoru do 17:00 v první den, případně do 14:00 druhý den. Měření bylo zejména první den ovlivňováno problémy se šnekovým podavačem paliva. Dřevní štěrka totiž obsahovala větší kusy dřeva, které způsobovaly zasekávání šnekového podavače.

Obr. 7.9 ukazuje teploty ve zplyňovacím zařízení v průběhu měření. Na grafu lze vidět postupné nahřívání generátoru až na provozní teplotu okolo 800 °C. Okolo 11:00 byl reaktor dostatečně rozpálen a vše bylo připraveno k prvnímu měření. V 11:10 však došlo k prvnímu zaseknutí šnekového podavače paliva a k odstávce zplyňovacího reaktoru. Funkce šnekového podavače byla v rámci několika minut opravena, bylo však nutno opět vyčkat na ustálení reaktoru. V 11:55 a později v 12:50 došlo k dalším zaseknutím podavače. Poté bylo do reaktoru dodáváno pouze palivo zbavené největších kusů štěrky, což problém s podavačem paliva vyřešilo a během tohoto ani dalšího měřicího dne již k žádným podobným problémům nedocházelo.



Obr. 7.9 Graf průběhu teplot 18.4.2018

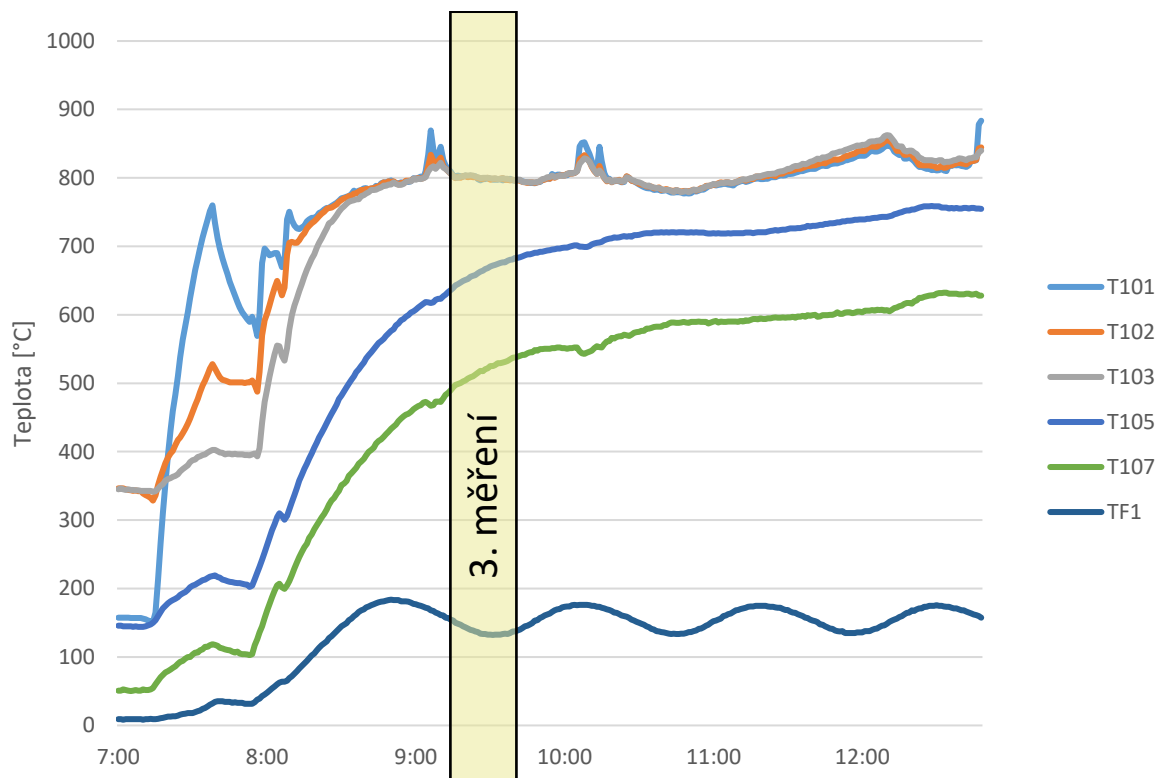
Okolo 13:30 bylo započato první měření, kde bylo cílem otestovat pračku s vodou o nejnižší možné teplotě. Ve výpočtové části jsme předpokládali, že budeme schopni snížit teplotu vody v pračce na 4 °C. Před měřením jsme naplnili nádrž pračky vodou a velkým množstvím ledové tříště, což dokázalo snížit teplotu prací vody až na 2 °C.

Plyn byl do měřicí tratě vpuštěn přesně v 13:33. 100 litrů plynu prošlo odběrovou tratí pro znečištěný plyn již po 20 minutách, tedy v 13:53. Odběrovou tratí za mokrou pračkou prošlo stejné množství plynu až 36 minutách, tedy 14:09. Průtok pračkou byl tedy téměř poloviční.

Druhé měření pro teplotu vody 20 °C bylo spuštěno v 15:07 a rozdíl průtoků byl ještě větší. 100 litrů znečištěného plynu prošlo první tratí již po 15 minutách a trati s mokrou pračkou to zabralo 52 minut.

V příštích měřeních jsme se snažili vyrovnat průtok plynu v obou tratích, to se nám ale povedlo zdokonalit až odpoledne další den, kdy se čas potřebný pro odběr 100 litrů plynu v obou tratích lišil maximálně o 2 minuty. To už ale byla hotova všechna měření pro tuto diplomovou práci a prováděla se měření pro jinou, podobnou práci. Tento rozdíl průtoků plynů v obou měřicích tratích ale při zhodnocování výsledků nezpůsobil žádné problémy.

Díky časovému skluzu byla první den provedena jen tato dvě měření. Poslední měření pro teplotu vody 40 °C probíhalo další den v dopoledních hodinách (obr. 7.10). Problémy s podavačem, resp. palivem byly vyřešeny, a tak druhý den probíhal mnohem plynuleji. Graf teplot pro druhý den měření je na obr. 7.10. Při porovnání s předchozím grafem můžeme vidět, že graf pro druhý den je mnohem plynulejší a bez výraznějších výkyvů.



Obr. 7.10 Graf průběhu teplot 19.4.2018

8 Výsledky experimentální části

V této kapitole jsou vyhodnoceny vzorky z jednorázových odběrů plynu a odběrových tratí dehtu. Z jednorázových odběrů se zjišťovalo chemické složení plynu, odběrové tratě sloužily ke zjištění složení dehtu.

Díky nim můžeme zhodnotit:

- změny složení plynu před a za pračkou
- účinnost mokré pračky pro jednotlivé teploty

8.1 Jednorázové odběry

Jednorázové odběry se vždy prováděly současně před a za pračkou s co nejmenší časovou prodlevou. Vhodným příkladem může být složení plynů odebraných před a za pračkou těsně před druhým měřením, tedy okolo 15:00. Složení těchto vzorků znázorňuje tab. 8.1.

Tab. 8.1 Složení plynu před a za pračkou 18.4.2018 v 15:00

složka plynu	obsah v plynu	
	před pračkou	za pračkou
H ₂	6,570	6,435
CO ₂	18,405	18,335
C ₂ H ₄	0,816	0,832
C ₂ H ₆	0,064	0,070
H ₂ S	0,000	0,000
O ₂	0,348	0,476
N ₂	51,806	52,034
CH ₄	4,314	4,335
CO	17,678	17,481

Z tabulky můžeme vidět, že změny složení jsou minimální, pravděpodobně způsobené chybou měření nebo změnou produkovaného plynu v důsledku mírného časového odstupu při odběrech před a za pračkou. Jediným větším rozdílem je vyšší obsah kyslíku za pračkou, to mohlo být způsobeno například přísáváním sekundárního vzduchu skrze netěsnosti v průběhu trati. Můžeme tedy říct, že složení plynu se průchodem mokrou pračkou nemění. To je důkazem toho, že dehet je v mokré pračce jen zachycován a nedochází k jeho rozkladu.

Ke změně složení by docházelo například při využití katalyzátorů pro odstranění dehtu. Při této metodě dochází k rozkladu dehtových látek a nárůstu podílu CO a H₂ v plynu.

8.2 Vzorky dehtu

Vzorky dehtu byly odebírány při každém měření před i za pračkou. Jejich odběr probíhal v odběrové trati, která je podrobněji popsána v Kap. 7.2.1. V promývačkách je aceton, který se používá pro vysokou rozpustnost dehtu. Po průchodu 100 litrů plynu jsou promývačky vyjmuty z trati a jejich obsah je slit do vzorkovnic. Produktem jednoho měření tak jsou dvě vzorkovnice, jedna pro vzorek dehtu před pračkou a druhý pro vzorek dehtu za pračkou. Vzorkovnice bylo nutno správně popsat, aby nedošlo k pomíchání výsledků.

Na obr. 8.1 můžete vidět vzorky dehtu z plynu před pračkou (vlevo) a za pračkou (vpravo) při prvním měření (tedy při teplotě prací kapaliny 2 °C).



Obr. 8.1 Vzorky dehtu před pračkou (vlevo) a za pračkou (vpravo)

8.2.1 Složení dehtu při teplotě vody 2 °C

Kromě množství dehtu je důležité také jeho složení. Tab. 8.2 ukazuje složení dehtu v odběrech při prvním měření.

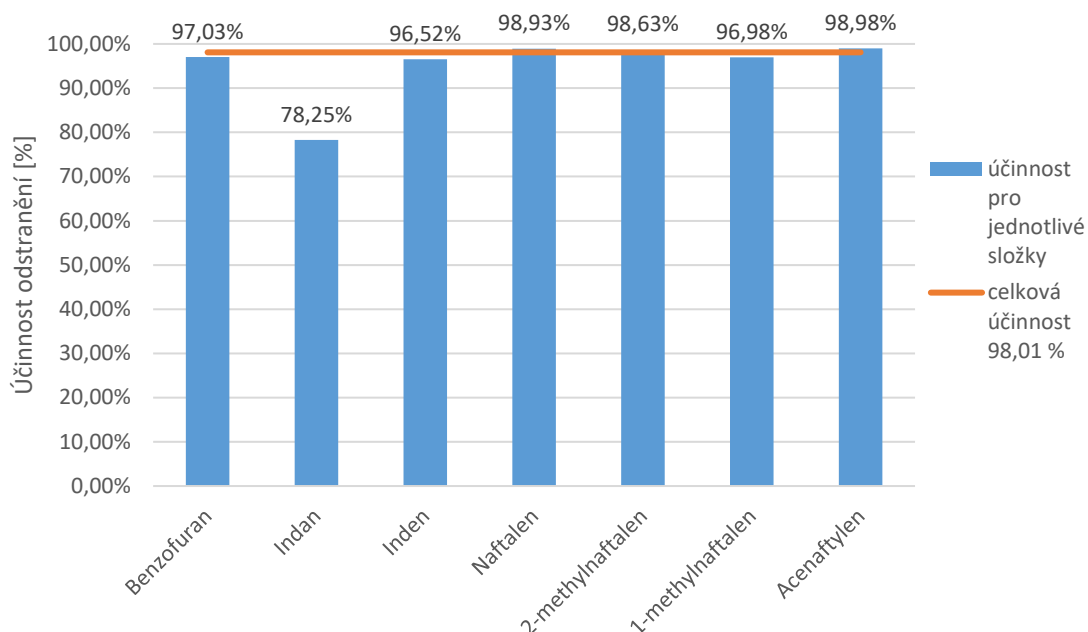
Tab. 8.2 Složení dehtu před a za pračkou a účinnost pračky při teplotě prací vody 2 °C

dehtová složka	obsah				účinnost
	před pračkou		za pračkou		
	[mg·m ⁻³]	[%]	[mg·m ⁻³]	[%]	[%]
Benzofuran	70,24	4,93	2,08	7,67	97,03
Indan	6,94	0,49	1,51	5,55	78,25
Inden	419,52	29,43	14,62	53,80	96,52
Naftalen	632,39	44,36	6,76	24,88	98,93
Benzothiofen	6,55	0,46	—	—	—
2-methylnaftalen	53,05	3,72	0,73	2,67	98,63
1-methylnaftalen	28,69	2,01	0,87	3,19	96,98
Bifenyl	16,45	1,15	—	—	—
2,6-dimethylnaftalen	6,23	0,44	—	—	—
Acenaftylen	59,86	4,20	0,61	2,24	98,98
Acenaften	7,17	0,50	—	—	—
Dibenzofuran	10,76	0,75	—	—	—
Fluoren	17,95	1,26	—	—	—
Fenantren	25,44	1,78	—	—	—
Antracen	14,91	1,05	—	—	—
1-methylfenantren	7,11	0,50	—	—	—
Fluoranthén	12,53	0,88	—	—	—
Pyren	12,66	0,89	—	—	—
Benzantracen	9,05	0,63	—	—	—
Chrysen	8,02	0,56	—	—	—
Σ	1425,50	100	27,17	100	98,09

Surový generovaný plyn při prvním měření obsahoval 1425,5 mg·m⁻³ dehtu, zatímco v odběru za pračkou bylo naměřeno jen 27,17 mg·m⁻³ dehtu. Celková účinnost pračky pro odstraňování dehtu při teplotě vody 2 °C dosahovala 98,09 %. Vzhledem k tomu, že se jedná o nejzákladnější mokrou pračku s minimálními pořizovacími či provozními náklady, je dosažená účinnost poměrně vyšší než očekávaná.

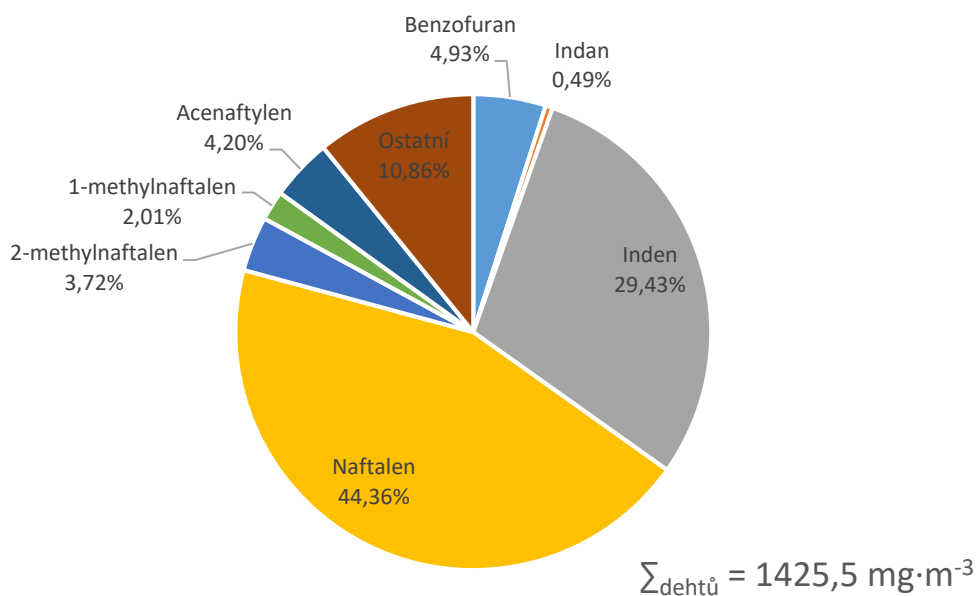
Účinnost při této teplotě byla tak vysoká, že v čištěném plynu bylo možno identifikovat jen hlavní složky dehtu. Obsah dehtových látek, které se již v surovém plynu nacházely v malých množstvích, se při průchodu pračkou snížil na tak malé hodnoty, že byly při analýze neidentifikovatelné. Proto není u většiny látek u čištěného plynu uveden jejich obsah.

V tab. 8.2 je zajímavé sledovat účinnost odstranění jednotlivých složek. Celková účinnost při tomto měření tedy dosahovala 98,09 %. Dehet je ale složen z mnoha látek a účinnost odstranění pro každou z nich se v některých případech až velmi lišila. Obr. 8.2 graficky znázorňuje tyto účinnosti v porovnání s celkovou účinností.



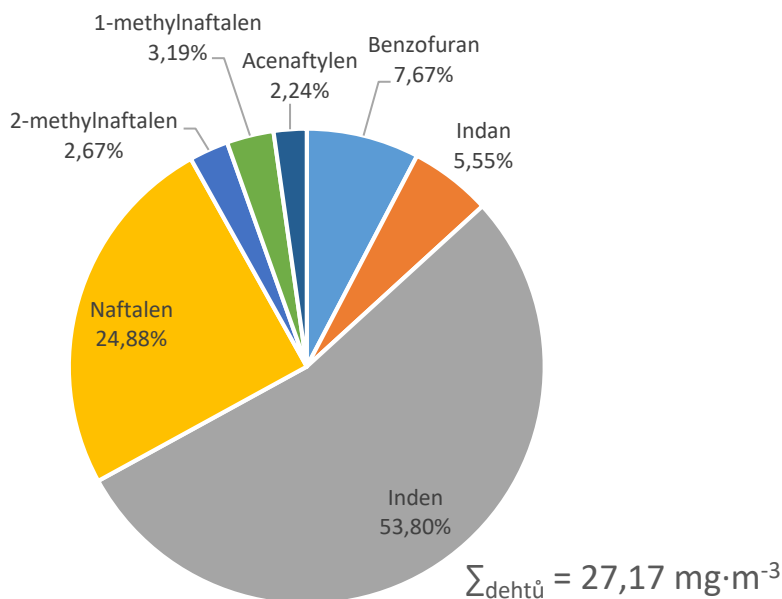
Obr. 8.2 Účinnost odstranění jednotlivých složek při teplotě 2 °C

S předchozím grafem souvisí také obr. 8.3 a obr. 8.4, které porovnávají složení dehtu před a za pračkou.



Obr. 8.3 Složení dehtu před pračkou při teplotě 2 °C

Hlavními složkami dehtu v odběru před pračkou byl naftalen, který zastupoval 44,36 % celkového dehtu a inden s 29,43 %. Jiné dehtové látky byly zastoupeny v řádech jednotek případně desetin procent. Jak lze vidět v grafu na obr. 8.2, odstraňování naftalenu probíhalo při teplotě vody 2 °C s účinností 98,93 % a odstraňování indenu s účinností 96,52 %. V důsledku toho se změnilo procentní zastoupení dehtu za pračkou, které je graficky znázorněno na obr. 8.4. Obsah indenu se za pračkou v důsledku nižší účinnosti odstranění zvýšil na 53,8 % a obsah naftalenu se (naopak v důsledku vyšší účinnosti odstranění) snížil na 24,88 %. S nejnižší účinností 78,25 % byl v pračce odstraňován indan. Výsledkem je nejvýraznější navýšení obsahu z 0,49 % před pračkou na 5,55 % za pračkou.



Obr. 8.4 Složení dehtu za pračkou při teplotě 2 °C

U každého z výsečových grafů je důležité sledovat také celkové množství dehtu. Obr. 8.3 znázorňuje složení dehtu, který je v plynu v koncentraci $1425,5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, zatímco v druhém případě je koncentrace jen $27,17 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. To znamená, že i inden jehož obsah se zvýšil z 29,43 % na 53,8 % se odstraňoval s vysokou účinností.

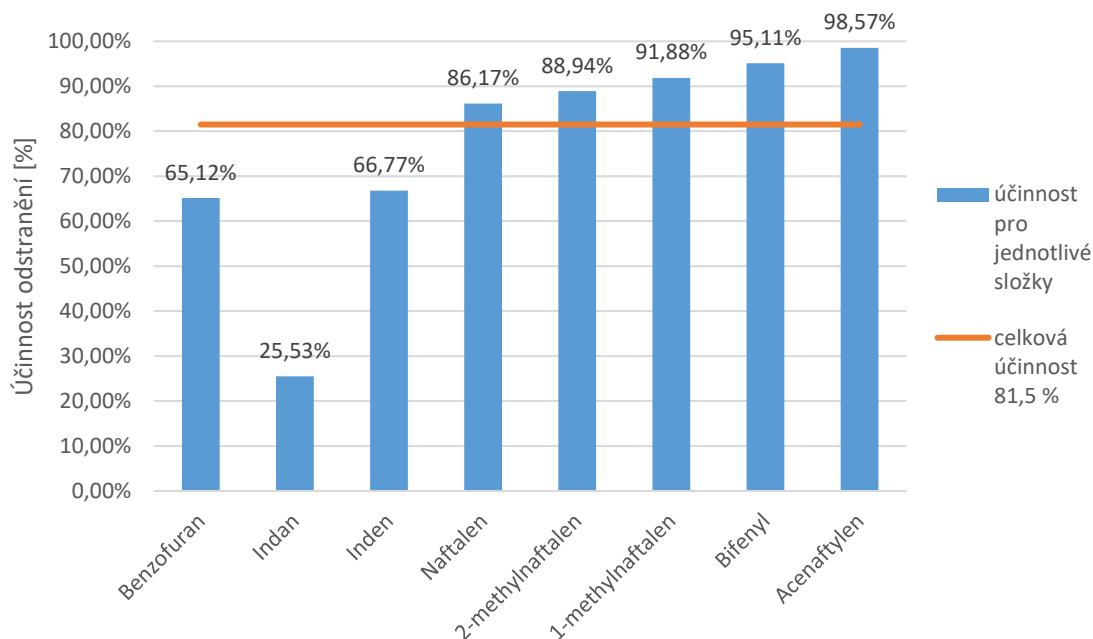
8.2.2 Složení dehtu při teplotě vody 20 °C

Při druhém měření byla jedinou změnou teplota vody v pračce. Tab. 8.3 opět znázorňuje složení dehtu před a za plynem. Lze si všimnout, že během druhého měření produkoval reaktor plyn s mnohem menším obsahem dehtu ($1425,5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ při prvním měření, $593,36 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ při druhém). Právě z tohoto důvodu se vždy prováděly odběry současně před i za pračkou plynu. Složení dehtu za pračkou tak vždy můžeme vztáhnout ke složení před pračkou, díky čemuž nedochází ke zkreslování výsledků.

Tab. 8.3 Složení dehtu před a za pračkou a účinnost pračky při teplotě prací vody 20 °C

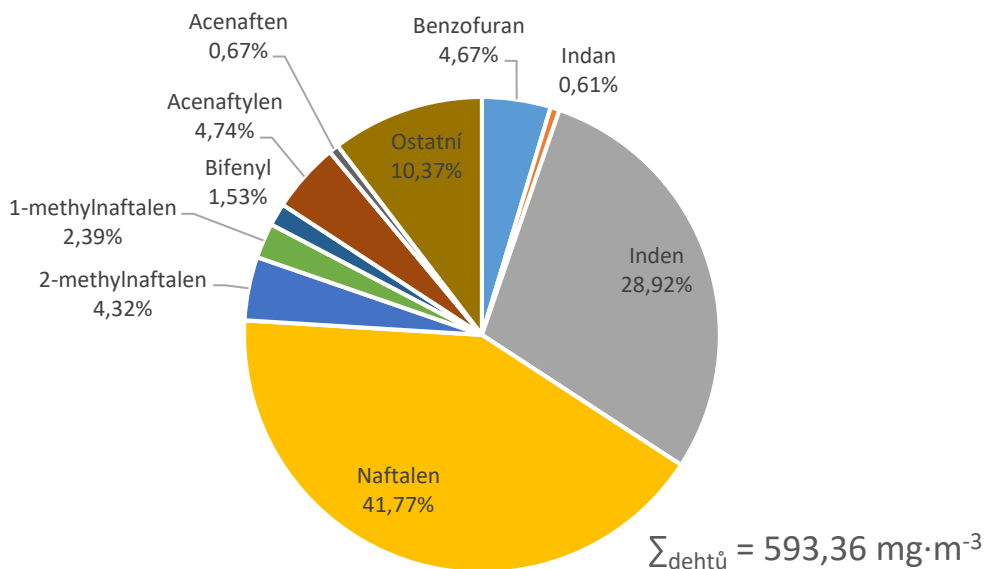
dehtová složka	obsah				účinnost
	před pračkou		za pračkou		
	[mg·m ⁻³]	[%]	[mg·m ⁻³]	[%]	[%]
Benzofuran	27,72	4,67	9,67	8,80	65,12
Indan	3,65	0,61	2,72	2,47	25,53
Inden	171,62	28,92	57,02	51,93	66,77
Naftalen	247,83	41,77	34,28	31,23	86,17
Benzothiofen	3,52	0,59	0,42	0,38	88,12
2-methylnaftalen	25,63	4,32	2,84	2,58	88,94
1-methylnaftalen	14,16	2,39	1,15	1,05	91,88
Bifenyl	9,09	1,53	0,44	0,40	95,11
2,6-dimethylnaftalen	3,87	0,65	—	—	—
Acenaftylen	28,15	4,74	0,40	0,37	98,57
Acenaften	3,99	0,67	0,38	0,35	90,44
Dibenzofuran	5,90	0,99	—	—	—
Fluoren	8,08	1,36	—	—	—
Fenantren	9,73	1,64	—	—	—
Antracen	6,22	1,05	—	—	—
1-methylfenantren	4,06	0,68	—	—	—
Fluoranthén	5,41	0,91	—	—	—
Pyren	5,36	0,90	—	—	—
Benzantracen	4,95	0,83	—	—	—
Chrysen	4,44	0,75	—	—	—
Σ	593,36	100	109,80	100	81,50

Zvýšením teploty vody na 20 °C došlo k poměrně výraznému snížení celkové účinnosti na 81,5 %. To lze mimo jiné vidět také na zvýšení identifikovaných složek v čištěném plynu. Zatímco při prvním měření se v plynu dokázalo identifikovat jen sedm látek, při druhém už se jednalo o deset.



Obr. 8.5 Účinnost odstranění jednotlivých složek při teplotě 20 °C

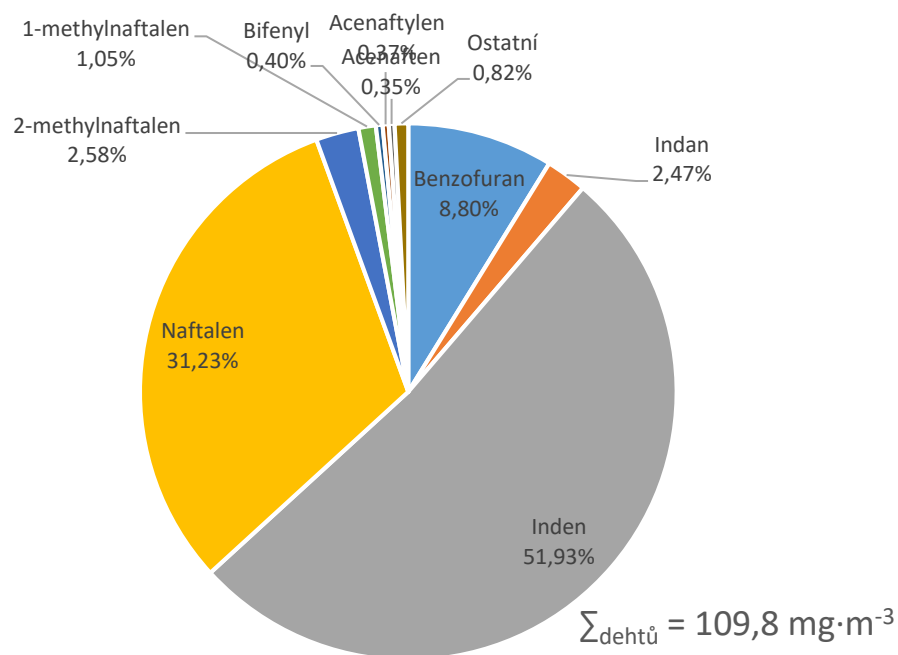
I přes celkový nižší obsah dehtu v surovém plynu zůstal poměr dehtových složek podobný. V surovém plynu zastupoval naftalen 41,77 % a inden 28,92 % dehtových látek (první měření 44,36 % a 29,43 %).



Obr. 8.6 Složení dehtu před pračkou při teplotě 20 °C

Během prvního měření se nejnižší účinností odstraňování vyznačoval indan a to 78,25 %. Při navýšení teploty na 20 °C ale došlo k dalšímu razantnímu snížení jeho účinnosti odstranění na pouhých 25,53 %. K mírnějšímu, ale stále výraznému poklesu účinnosti došlo také v případě benzofuranu (z 97,03 % na 65,12 %) a indenu (z 96,52 % na 66,77 %). Díky těmto rozdílným

účinností odstranění se procentuální složení plynu za pračkou, stejně jako v prvním případě, změnilo. Složení plynu za pračkou znázorňuje obr. 8.7.



Obr. 8.7 Složení dehtu za pračkou při teplotě 20 °C

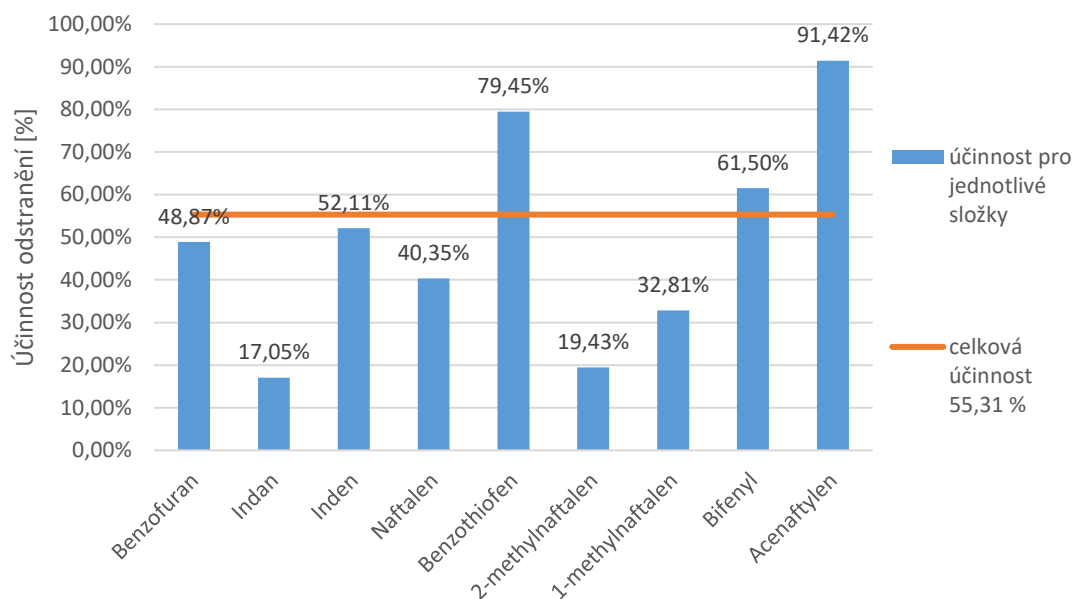
8.2.3 Složení dehtu při teplotě vody 40 °C

V tab. 8.4 je stejně jako při prvních dvou měřeních složení dehtu v plynu před a za pračkou.

Tab. 8.4 Složení dehtu před a za pračkou a účinnost pračky při teplotě prací vody 40 °C

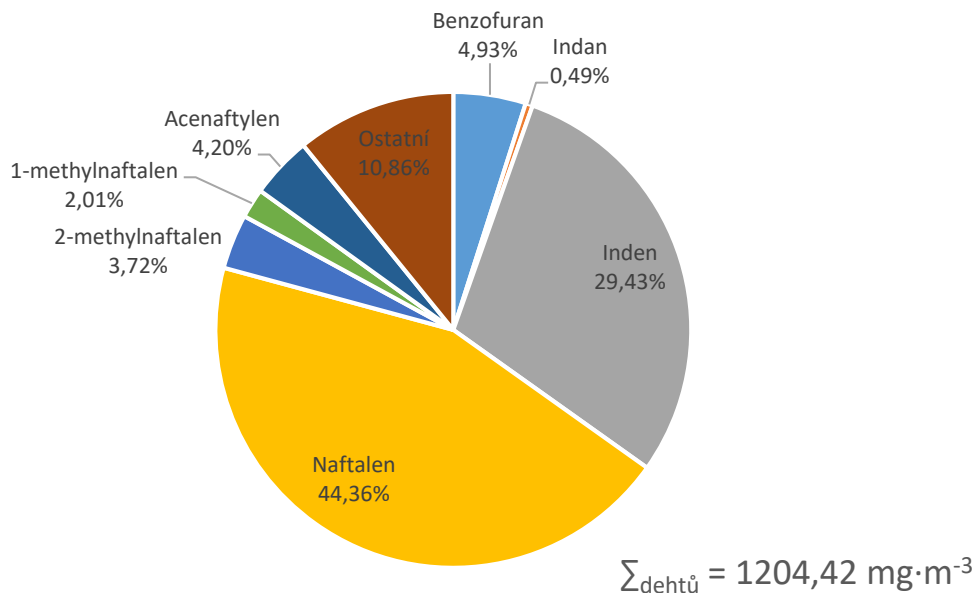
dehtová složka	obsah				účinnost
	před pračkou		za pračkou		
	[mg·m ⁻³]	[%]	[mg·m ⁻³]	[%]	[%]
Benzofuran	67,51	5,61	34,52	6,41	48,87
Indan	4,86	0,40	4,03	0,75	17,05
Inden	328,42	27,27	157,27	29,22	52,11
Naftalen	379,11	31,48	226,13	42,01	40,35
Benzothiofen	4,24	0,35	0,87	0,16	79,45
Chinolin	8,89	0,74	0,95	0,18	89,35
Indol	11,34	0,94	1,99	0,37	82,44
2-methylnaftalen	47,87	3,97	38,57	7,16	19,43
1-methylnaftalen	26,60	2,21	17,87	3,32	32,81
Bifenyl	19,75	1,64	7,60	1,41	61,50
2,6-dimethylnaftalen	5,18	0,43	1,52	0,28	70,70
Acenaftylen	101,97	8,47	8,75	1,63	91,42
Acenaften	7,37	0,61	3,07	0,57	58,40
Dibenzofuran	14,24	1,18	2,37	0,44	83,34
Fluoren	33,10	2,75	3,76	0,70	88,63
Fenantren	44,43	3,69	7,09	1,32	84,04
Antracen	21,91	1,82	3,86	0,72	82,38
Karbazol	5,51	0,46	1,26	0,23	77,19
1-methylfenantren	5,83	0,48	3,77	0,70	35,33
Fluoranthén	16,36	1,36	3,79	0,70	76,82
Pyren	16,17	1,34	1,84	0,34	88,60
Benzantracen	8,31	0,69	1,64	0,30	80,27
Chrysen	7,11	0,59	1,66	0,31	76,61
Benzofluoranten	5,81	0,48	1,42	0,26	75,50
Benzopyren	4,68	0,39	1,03	0,19	78,10
Perylen	7,88	0,65	1,65	0,31	79,06
Σ	1204,42	100	538,28	100	55,31

Můžeme vidět, že při zvýšení teploty prací kapaliny na 40 °C se účinnost pračky opět snížila, a to na 55,31 %. Tato účinnost už je tak nízká, že při analýze bylo možno identifikovat všechny složky dehtu, které se nacházely v surovém plynu. Při teplotě vody 2 °C se podařilo identifikovat jen sedm složek.

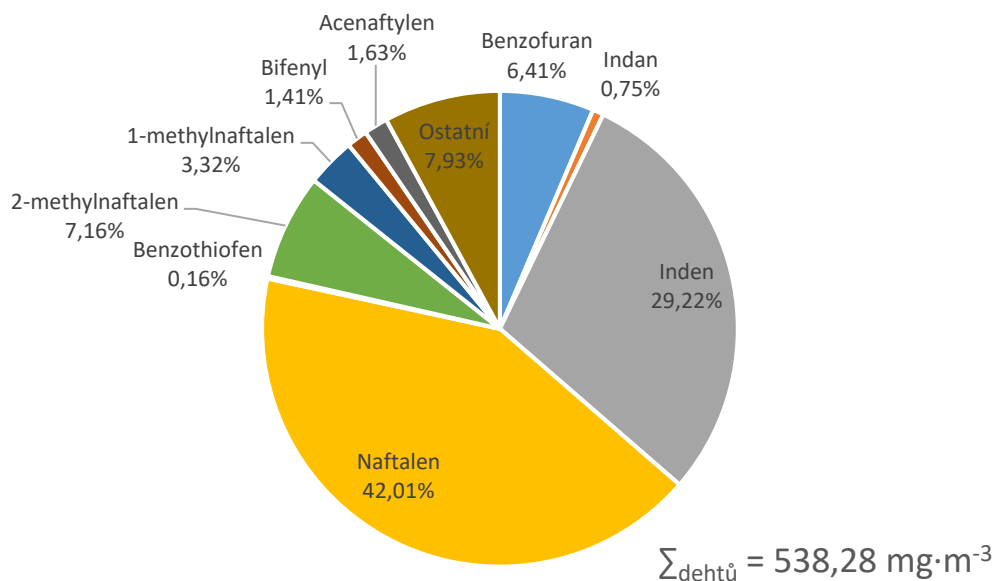


Obr. 8.8 Účinnost odstranění jednotlivých složek při teplotě 40 °C

Jak lze vidět na obr. 8.8, účinnost odstranění jednotlivých složek už se výrazně liší. Zatímco látky jako indan a 2-methylnaftalen dosahují účinnosti nižší než 20 %, například acenaftylen si i při teplotě vody 40 °C dokázal udržet účinnost odstranění nad 90 %.



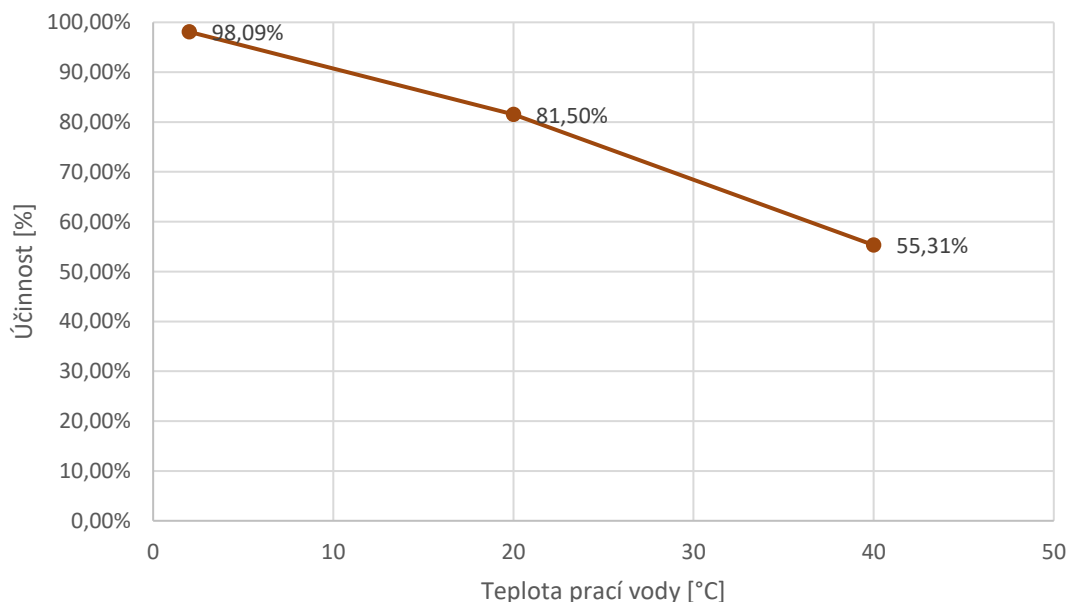
Obr. 8.9 Složení dehtu před pračkou při teplotě 40 °C



Obr. 8.10 Složení dehtu za pračkou při teplotě 40 °C

8.3 Účinnost odstranění dehtu v závislosti na teplotě prací kapaliny

Jak lze z předchozích grafů a tabulek vyčíst, při zvyšování teploty prací kapaliny dochází k výraznému snižování účinnosti. Závislost celkové účinnosti mokré vypírky na teplotě prací kapaliny je zobrazena na obr. 8.11.



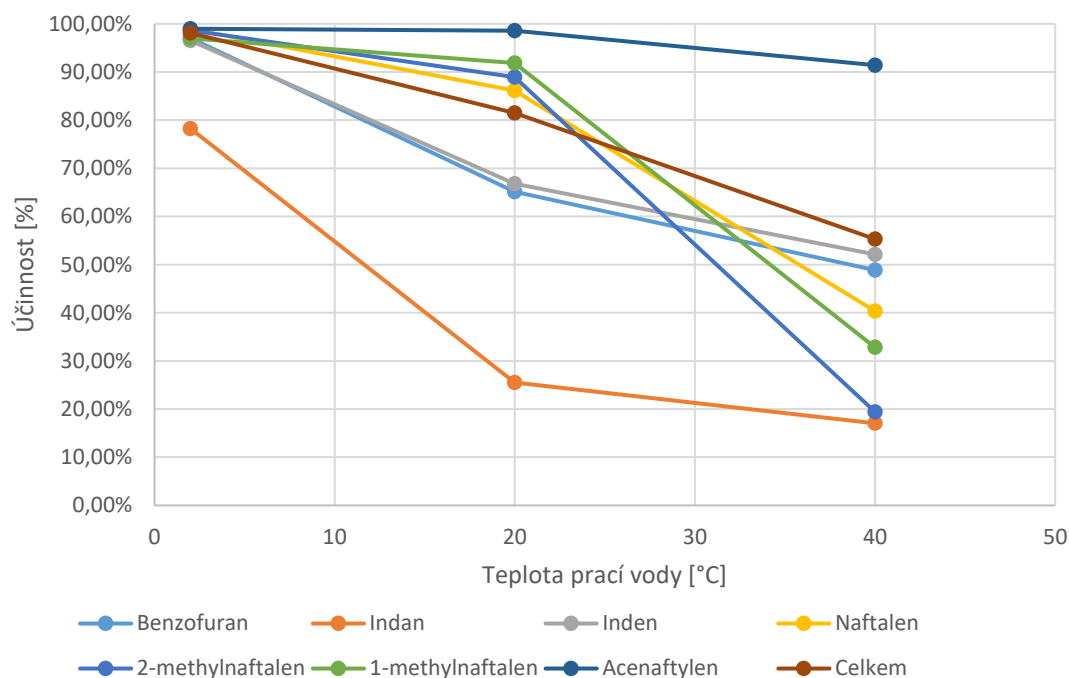
Obr. 8.11 Závislost účinnosti odstranění dehtu na teplotě prací kapaliny

Celková účinnost pračky má předpokládaný charakter – účinnost odstranění dehtu se s rostoucí teplotou snižuje. Kromě celkové účinnosti je zajímavé sledovat závislosti účinnosti na teplotě pro jednotlivé složky, které jsou v tab. 8.5.

Tab. 8.5 Účinnost odstranění složek pro různé teploty vody

	Teplota prací vody		
	2 °C	20 °C	40 °C
Benzofuran	97,03%	65,12%	48,87%
Indan	78,25%	25,53%	17,05%
Inden	96,52%	66,77%	52,11%
Naftalen	98,93%	86,17%	40,35%
2-methylnaftalen	98,63%	88,94%	19,43%
1-methylnaftalen	96,98%	91,88%	32,81%
Acenaftylen	98,98%	98,57%	91,42%
Celkem	98,09%	81,50%	55,31%

Tab 8.5 je pro větší přehlednost znázorněna graficky na obr. 8.12.



Obr. 8.12 Účinnosti odstranění jednotlivých složek v závislosti na teplotě.

Při 2 °C jsou téměř všechny dehtové složky odstraňovány s účinností v rozmezí 96–99 %. Jedinou výjimkou je indan, jehož účinnost i při 2 °C dosahuje jen 78 %.

Při navýšení teploty prací vody na 20 °C došlo u všech dehtových složek ke snížení účinnosti. U některých složek byl pokles malý, zatímco například u indenu, který v plynu zastupoval asi třetinu všech dehtových složek, se účinnost snížila až na 66 %.

K dalšímu snížení účinností došlo při využití vody o teplotě 40 °C. Účinnost se u některých látek snižovala výrazně méně než u jiných. Zajímavý je zejména skokový pokles účinností 1-methylnaftalenu, 2-methylnaftalenu a naftalenu při měřeních s 20 °C vodou a 40 °C vodou. Při teplotě vody 20 °C se účinnost odstranění těchto látek pohybuje mezi 86–92 %. Při 40 °C je ale účinnost odstranění 1-methylnaftalenu 32,81 %, 2-methylnaftalenu dokonce 19,43 % a naftalenu 40,35 %.

ZÁVĚR

Práce se zabývala problematikou týkající se nečistot v odpadních a generovaných plynech a obsahovala jak rešeršní, tak experimentální část.

První část práce je literární rešerší, která obsahuje širokou škálu informací týkající se zplyňování biomasy, odpadních plynů a nečistot v něm obsažených. V úvodu je stručně popsána biomasa, která je využívána jako palivo při zplyňování, jehož popis následuje v další části. Dále jsou zmíněny základní odpadní plyny s potenciálem k využití v energetice. Je popsán jejich původ, typické složení a další informace.

Generované a odpadní plyny jsou plynné látky, které mohou být využívány jako plynné palivo a sloužit jako levnější náhrada zemního plynu. Jejich hlavní nevýhodou je ale vysoký obsah nečistot, kterými se zabývá následující kapitola. Nečistot existuje celá řada, velká pozornost je věnována zejména dehtu, který je největším problémem zplyňování.

Poměrně velká část práce je věnována mokré pračce, což je jedna z metod odstraňování nečistot, kterou je možno využít pro čištění téměř jakéhokoliv typu nečistot. Proto jsou popsány principy odstraňování nečistot v mokré pračce, možné prací kapaliny i zařízení pro mokrou vypírku. Protože ale mokrá pračka není jediným způsobem čištění odpadních a generovaných plynů jsou v následující kapitole popsány také jiné metody.

Funkci pračky ovlivňuje typ použité prací kapaliny a konstrukce pračky. Důležitá je ale také teplota prací kapaliny, jejíž vlivem se zabývá experimentální část. Pro testování účinnosti mokré pračky při různých teplotách prací kapaliny bylo použito fluidní zplyňovací zařízení Biofluid. To produkovalo generovaný plyn, k jehož čištění byla navržena čistící trať. Ta se skládala z přívodní trubky plynu, filtru hrubých nečistot a mokré pračky skládající se ze čtyř sériově zapojených promývaček. Za ní byla zapojena odběrová trať, která odebírala vzorky dehtu za pračkou. Současně vždy fungovala také druhá odběrová trať, která odebírala vzorky dehtu před pračkou. Prováděla se měření pro teplotu vody 2 °C, 20 °C a 40 °C, ze kterých se zjišťovala změna účinnosti odstranění dehtu v závislosti na teplotě vody.

Výsledky měření a jejich zhodnocení jsou obsaženy v kapitole 8.3. Nejvyšší účinnosti odstranění dehtu se dle očekávání dosáhlo při použití nejstudenější vody, tedy 2 °C. Celková účinnost při této teplotě dosahovala 98,01 %, což je vzhledem k jednoduchosti pračky poměrně vysoké číslo. Při měření s teplotou vody 20 °C klesla účinnost na 81,5 %, což je výrazný pokles. K ještě výraznější změně účinnosti ale došlo při zvýšení teploty vody na 40 °C, kdy pračka dosahovala celkové účinnosti jen 55,31 %. Účinnost se počítala z množství dehtu v plynu naměřených v odběrech dehtu před pračkou a za pračkou.

Pro účinnosti odstranění všech složek platilo, že při zvýšení teploty vody dochází ke snížení účinnosti. Pro některé dehtové složky se účinnost v závislosti na teplotě snižovala mírně. Takovým příkladem může být acenaftylen kde je účinnost pro teplotu vody 2 °C téměř 99 % a pro 40 °C 91,42 %.

U jiných látek je rozdíl mezi účinnostmi s teplotami vody 2 °C a 40 °C značný, nejvýraznějšího rozdílu dle měření dosáhl 2-methylnaftalen, jehož účinnost při 2 °C byla 98,63 %, tedy ještě nad celkovou účinností pračky. Při 40 °C byla ale jeho účinnost odstranění jen 19,43 %.

Určitě by bylo zajímavé sledovat, k jakým poklesům účinnosti by docházelo i při vyšších teplotách prací vody. Z praktického hlediska je to ale vcelku zbytečné, protože i měření pro tři teploty prací kapaliny ukázalo, že účinnost odstranění dehtu při zvyšující teplotě prací vody klesá. Navíc kdybychom prováděli například další dvě měření pro teplotu prací vody 60 °C a 80 °C, zcela jistě by již docházelo k nežádoucímu snižování teploty vody v průběhu měření, které bychom museli řešit ohřevem prací vody.

Obsah práce odpovídá původnímu zadání diplomové práce. Hlavním přínosem je experimentální ověření účinnosti odstraňování dehtu z plynu generovaného ve fluidním zplynovacím zařízení v závislosti na teplotě prací kapaliny. Bylo ověřeno, že účinnost se s rostoucí teplotou prací vody poměrně výrazně snižuje. Při nízkých teplotách ale pračka dosahovala vysokých účinností (okolo 98 % pro téměř všechny složky dehtu). V praxi by byla námi navrhnutá experimentální pračka nahrazena skutečnou mokrou pračkou, což by celkovou účinnost mohlo ještě navýšit.

Celkové zhodnocení práce je takové, že mokrá pračka využívající vodu jako prací kapalinu je jedním z použitelných řešení pro odstraňování dehtu z plynu. Důležité ale je využívat vodu o co nejnižší teplotě, což zaručí vysokou účinnost.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Souhrnné přehledy o půdním fondu z údajů katastru nemovitostí České republiky*. 1. vyd. Praha, 2018. ISBN 978-80-88197-02-7. ISSN 1804-2422. Dostupné také z: https://www.cuzk.cz/Periodika-a-publikace/Statisticke-udaje/Souhrne-prehledy-pudniho-fondu/Rocenska_pudniho_fondu_2018.aspx
- [2] ŠKORPÍK, Jiří. *Biomasa jako zdroj energie, Transformační technologie*, 2006-10, [last updated 2011-08]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line], ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/03.html>.
- [3] Biomasa – využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR. In: *Oenergetice.cz* [online]. 2017 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/biomasa-vyuziti-zpracovani-vyhody-a-nevyhody>
- [4] Energie biomasy. *EkoWATT* [online]. 2011 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://ekowatt.cz/cz/informace/obnovitelne-zdroje-energie/energie-biomasy>
- [5] KUMAR, Sunil a S. K. SHUKLA. *A Review on Recent Gasification Methods for Biomethane Gas Production*. In: *International Journal of Energy Engineering* [online]. World Academic Publishinf, 2016, s. 32-43 [cit. 2017-11-28]. DOI: 10.5923/s.ijee.201601.05. ISSN 2225-6571.
- [6] PEER, Václav a Pavel FRIEDEL. *Zplyňování: Principy a reaktory*. In: *TZB-info* [online]. Topinfo, 2016 [cit. 2017-11-23]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/13729-zplynovani-principy-a-reaktory>
- [7] POHOŘELÝ, M., M. JEREMIÁŠ, P. KAMENÍKOVÁ, S. SKOLIBA, K. SVOBODA a M. PUNČOCHÁŘ. *Zplyňování biomasy*. In: *Chemické listy* [online]. Záměstný, 2012, s. 267-274 [cit. 2017-11-23]. ISSN 123-7103.
- [8] KLASS, Donald. *Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals*. San Diego: Academic Press, 1998. ISBN 01-241-0950-0.
- [9] DRGA, M. *Zplyňování biomasy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. et Ing. Jan Škvařil.
- [10] OLOFSSON, I., NORDIN, A., AND SODERLIND, U. *Initial review and evaluation of process technologies and systems suitable for cost-efficient medium-scale gasification for biomass to liquid fuels*. Tech. Rep. ISSN 1653-0551 ETPC Report 05-02, University of Umea, Umea, Sweden, 2005
- [11] KUBÍK, Michal. *Název: Zplyňování biomasy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 60 s. Vedoucí práce Ing. Marek Baláš, Ph.D.
- [12] HLINČÍK, Tomáš. *Topné plyny – vlastnosti a klasifikace*. In: <https://www.vscht.cz> [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://web.vscht.cz/~hlincikt/Zaklady%20zpracovani%20a%20vyuziti%20uhlí%20a%20plynu/8.pdf>
- [13] YONGQI, LIU, WANG HAIFENG a LI PING. *Study on Combustion Characteristics of the Blast Furnace Gas in the Constant Volume Combustion Bomb* [online]. In: . [cit. 2018-05-10].
- [14] KÓL, Přemysl. *Spalování plynných paliv*, publikováno na stránkách Spalovací procesy, dostupné z <http://Spalovaci-procesy.wz.cz/PP.html>, 2011.
- [15] TOMAN, Vladimír. *Energetika: Koksovny*. In: *Ekomonitor* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z:

- http://www.ekomonitor.cz/sites/default/files/obrazky/seminare/ovzdusi/seminar3/2_to_man_final.pdf
- [16] OPLUŠTIL, Josef. Důlní plyn jako druhotný zdroj energie pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla. *TZB-info.cz* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/kogenerace/5644-dulni-plyn-jako-druhotny-zdroj-energie-pro-kombinovanou-vyrobu-elektriny-a-tepla>
- [17] Anaerobní technologie. *Bioplyn* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: http://www.bioplyn.cz/at_popis.htm
- [18] RICHARDSON, Y., M. DROBEK, A. JULBE, J. BLIN a F. PINTA. Biomass Gasification to Produce Syngas. *Recent Advances in Thermochemical Conversion of Biomass*. Netherlands: Elsevier, 2015, s. 213-250. ISBN 978-0-444-63289-0.
- [19] CHEREMISINOFF, Nicholas P.; REZAIYAN, John. *Gasification technologies: a primer for engineers and scientists*. CRC press, 2005.
- [20] STEVENS, Don. *Hot Gas Conditioning: Recent Progress With Larger - Scale Biomass Gasification System*. NREL/SR-510-29952. Colorado, USA, 2001.
- [21] FRIEDEL, Pavel a Václav PEER. Nežádoucí látky vznikající při zplyňování. In: *TZB-info* [online]. Topinfo, 2016 [cit. 2017-11-23]. Dostupné z: <http://energetika.tzb-info.cz/14932-nezadouci-latky-vznikajici-pri-zplynovani>
- [22] BASU, Prabir. *Combustion and gasification in fluidized beds*. CRC press, 2006, 1. vyd, 470 s., ISBN 0-8493-3396-2.
- [23] MILNE, Thomas A.; EVANS, Robert J.; ABATZAGLOU, N. Biomass Gasifier "Tars": Their Nature, Formation, and Conversion. *National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO (US)*, 1998.
- [24] LI, Chunshan; SUZUKI, Kenzi. *Resources, properties and utilization of tar. Resources, Conservation and Recycling*, 2010, 54.11: 905-915
- [25] KURKELA, E. Formation and removal of biomass-derived contaminants in fluidized-bed gasification processes. In: *Fuel and Energy Abstracts*. 1998. p. 187.
- [26] SIKARWAR, Vineet Singh, et al. An overview of advances in biomass gasification. *Energy & Environmental Science*, 2016, 9.10: 2939-2977.
- [27] BERGMAN, Patrick CA; VAN PAASEN, Sander VB; BOERRIGTER, Harold. The novel "OLGA" technology for complete tar removal from biomass producer gas. In: *Pyrolysis and gasification of biomass and waste, expert meeting*, Strasbourg, France. 2002.
- [28] Classification system. In: *Thersites the ECN dew point site* [online]. Netherlands: ECN-Biomass, b.r. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://www.thersites.nl/classification.aspx>
- [29] ASADULLAH, Mohammad. *Biomass gasification gas cleaning for downstream applications: A comparative critical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 40: 118-132.
- [30] HARRAD, Stuart. *Persistent organic pollutants*. John Wiley & Sons, 2009.
- [31] RITTER, L., et al. *A review of selected persistent organic pollutants*. International Programme on Chemical Safety (IPCS). PCS/95.39. Geneva: World Health Organization, 1995, 65: 66.
- [32] KUBÍČEK, J. *Mokrý čištění energoplynu před jeho využitím ve spalovacím motoru*. Brno, 2005. Disertace. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství,.

- [33] HUTSON, Nick D.; KRZYZYNSKA, Renata; SRIVASTAVA, Ravi K. *Simultaneous removal of SO₂, NO_x, and Hg from coal flue gas using a NaClO₂-enhanced wet scrubber*. Industrial & engineering chemistry research, 2008, 47.16: 5825-5831.
- [34] Čištění plynů. *Fakulta životního prostředí: Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem* [online]. Ústí nad Labem: FZP, b.r. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: http://fzp.ujep.cz/ktv/uc_texty/pt3/13%20CisteniPlynu.pdf
- [35] HAN, Jun; KIM, Heejoon. *The reduction and control technology of tar during biomass gasification/pyrolysis: an overview*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, 12.2: 397-416.
- [36] Gas scrubbing - general. *EMIS* [online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <https://emis.vito.be/en/techniekfiche/gas-scrubbing-general>
- [37] PHUPHUAKRA, T., T. NAMIOKA a K. YOSHIKAWA. Absorptive removal of biomass tar using water and oily materials. In: *Bioresource Technologies* [online]. 2011, s. 543-549 [cit. 2018-04-22].
- [38] BALÁŠ, M., M. LISÝ, Z. SKÁLA a J. POSPÍŠIL. Wet scrubber for cleaning of syngas from biomass gasification. In: *Advances in Environmental Sciences, Development and Chemistry*. Santorini, 2014, s. 195-201. ISBN 978-1-61804-239-2.
- [39] GUO, Xuejun Jack; TAK, Jin Kwon; JOHNSON, Richard L. *Ammonia removal from air stream and biogas by a H₂SO₄ impregnated adsorbent originating from waste wood-shavings and biosolids*. Journal of hazardous materials, 2009, 166.1: 372-376.
- [40] Acid scrubber. *EMIS* [online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <https://emis.vito.be/nl/node/19466>
- [41] Wet lime scrubbing. *EMIS* [online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <https://emis.vito.be/nl/node/19469>
- [42] Alkaline scrubber. *EMIS* [online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <https://emis.vito.be/nl/node/19467>
- [43] JUMAH, R. a A. MUJUMDAR. *Dryer Emission Control Systems* [online]. b.r., 1041-1073 [cit. 2018-05-21]. DOI: 10.1201/9781420017618.ch45. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/264890206_45_Dryer_Emission_Control_Systems
- [44] Monitoring by Control Technique - Wet Scrubber For Particulate Matter. *EPA* [online]. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/air-emissions-monitoring-knowledge-base/monitoring-control-technique-wet-scrubber-particulate-matter>
- [45] *Tray Distillation Tower*. In: *Wikimedia* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d6/Tray_Distillation_Tower_EN.svg/2000px-Tray_Distillation_Tower_EN.svg.png
- [46] RHODES, Martin J. *Introduction to particle technology*. John Wiley & Sons, 2008.
- [47] Monitoring by Control Technique – Cyclone. *EPA* [online]. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/air-emissions-monitoring-knowledge-base/monitoring-control-technique-cyclone>
- [48] Dust-purification-techniques. *Lenntech* [online]. c1998-2018 [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <https://www.lenntech.com/air-purification/dust-purification-techniques/cyclones.htm#ixzz1UBdVGGUr>

- [49] Monitoring by Control Technique - Fabric Filters. *EPA*[online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/air-emissions-monitoring-knowledge-base/monitoring-control-technique-fabric-filters>
- [50] Monitoring by Control Technique - Electrostatic Precipitators. *EPA* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/air-emissions-monitoring-knowledge-base/monitoring-control-technique-electrostatic-precipitators>
- [51] PARKER, Ken R. (ed.). *Applied electrostatic precipitation*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [52] ANIS, Samsudin; ZAINAL, Z. A. *Tar reduction in biomass producer gas via mechanical, catalytic and thermal methods: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15.5: 2355-2377.
- [53] LISÝ, Martin, Marek BALÁŠ, Jiří MOSKALÍK a Otakar ŠTELCL. Biomass Gasification — Primary Methods for Eliminating Tar. *Acta Polytechnica* [online]. 2012(3), 66-70 [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/article/viewFile/1556/1388>
- [54] BALÁŠ, M. *Čištění energoplynu kovovými katalyzátory*. Brno, 2010. Disertace. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
- [55] Suché metody odsiřování. *Tenza* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <http://www.tenza.cz/cz/aktivity/energetika/technologie/zarizeni-pro-cisteni-spalin/suche-metody-odsirovani/>
- [56] Odsíření aneb technologické postupy snížení emisí v praxi. *OEnergetice* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/odsireni-aneb-technologicke-postupy-snizeni-emisi-v-praxi/>
- [57] Odsiřování. In: *fs.cvut.cz* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <https://users.fs.cvut.cz/~vybirpav/Ochrana%20ovzduši/Odsirovani.pdf>
- [58] Schéma mokré odsíření. In: *Tenza* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <http://www.tenza.cz/images/tenza.cz/aktivity/technologie/odsireni/schema-mokre-odsireni.jpeg>
- [59] Mokrý vápencová vypírka. *Tenza* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <http://www.tenza.cz/cz/aktivity/energetika/technologie/zarizeni-pro-cisteni-spalin/mokra-vapencova-vypirka/>
- [60] Schéma polosuché odsíření. In: *Tenza* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <http://www.tenza.cz/images/tenza.cz/aktivity/technologie/odsireni/schema-polosuche-odsireni.jpeg>
- [61] Polosuché odsiřovací zařízení s rozprašováním suspenze. *Tenza*[online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.tenza.cz/cz/aktivity/energetika/technologie/zarizeni-pro-cisteni-spalin/polosuche-odsirovaci-zarizeni-s-rozprasovanim-suspenze/>
- [62] *Guideline for Sampling and Analysis of Tar and Particles in Biomass Producer Gases* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <http://www.eeci.net/results/pdf/guideline-3.3-v2.pdf>
- [63] KOHOUT, Přemysl a Marek BALÁŠ. Snížování tvorby dehtů při zplyňování biomasy dávkováním inertních materiálů do fluidního lože. In: *Energie z biomasy IV*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005, s. 45-50. ISBN 80-214-3067-2.

- [64] JÍCHA, M. *Přenos tepla a látky*. Brno: CERM, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2029-4.
- [65] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Akademické nakladatelství CERM, 2011.
- [66] Energetické tabulky. In: *Ústav energetiky VŠCHT Praha* [online]. Praha: VŠCHT Praha, c2014 [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <http://uen.vscht.cz/files/uzel/10466/S81LLUpPLclMzj68UqEkMak0J7sSAA.pdf?redirected>
- [67] Korozivzdorné oceli - vlastnosti. In: *Cedinox* [online]. c2014 [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: http://www.cedinox.es/opencms901/export/sites/cedinox/.galleries/publicaciones-tecnicas/StainlessSteelProperties_CZ.pdf
- [68] POHOŘELÝ, Michael; JEREMIÁŠ, Michal. Zplyňování biomasy – možnosti uplatnění. (kolektiv autorů). *Výsledky výzkumu, vývoje a inovací pro obnovitelné zdroje energie (OZE 2010)*.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Název
α_{plyn}	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	součinitel přestupu tepla plynu
α_{vzduch}	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	součinitel přestupu tepla vzduchu
β	K^{-1}	součinitel objemové roztažnosti
β_{vzduch}	K^{-1}	součinitel objemové roztažnosti vzduchu
δ	m	tloušťka
δ_{sklo}	m	tloušťka skleněné stěny nádrže
δ_{ps}	m	tloušťka polystyrenové izolace
δ_{sklo}	m	tloušťka skleněné stěny
δ_{ps}	m	tloušťka polystyrenové izolace
η	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	dynamická viskozita
η_i	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	dynamická viskozita i-té složky plynu
η_0	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	dynamická viskozita i-té složky plynu při 0 °C
λ	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	součinitel tepelné vodivosti plynu
λ_i	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	součinitel tepelné vodivosti i-té složky plynu
λ_{ocel}	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	součinitel tepelné vodivosti oceli
λ_{ps}	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	součinitel tepelné vodivosti polystyrenu
λ_{sklo}	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	součinitel tepelné vodivosti skla
λ_{vzduch}	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	součinitel tepelné vodivosti vzduchu
ν	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	kinematická viskozita
ν_{vzduch}	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	kinematická viskozita vzduchu
ρ	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	hustota
C	–	Sutherlandův koeficient
c_p	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	měrná tepelná kapacita
$c_{p,i}$	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	měrná tepelná kapacita složky plynu
d	m	vnitřní průměr trubky
D	m	vnější průměr trubky
g	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	tíhové zrychlení
Gr	–	Grashofovo číslo
ΔH	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	reakční teplo
k	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	součinitel teplotní vodivosti
L	m	délka trubky
l_{ch}	m	charakteristický rozměr

m	kg	hmotnost
M_m	$\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$	molární hmotnost
$M_{m,i}$	$\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$	molární hmotnost složky plynu
n	mol	látkové množství
Nu	–	Nusseltovo číslo
o	m	obvod stěny
p	Pa	tlak
Pr	–	Prandtlovo číslo
Pr_{vzduch}	–	Prandtlovo číslo vzduchu
Q_m	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	hmotnostní průtok
Q_{plyn}	J	teplo plynu
Q_{voda}	J	teplo vody
Q_z	J	tepelná ztráta
$Q_{z,i}$	J	tepelná ztráta i-té stěny
$Q_{z,\text{potrubí}}$	J	tepelná ztráta při průchodu potrubím
$Q_{z,\text{pračka}}$	J	tepelná ztráta v pračce
Q_v	$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	objemový průtok
R	$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$	univerzální plynová konstanta
$R_{1,i}$	$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$	tepelný odpor ze strany plynu i-té stěny
$R_{1,\text{potrubí}}$	$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$	tepelný odpor ze strany plynu v trubce
$R_{2,i}$	$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$	tepelný odpor skleněné i-té stěny
$R_{2,\text{potrubí}}$	$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$	tepelný odpor stěny trubky
$R_{3,i}$	$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$	tepelný odpor polystyrenové izolace i-té stěny
$R_{3,\text{potrubí}}$	$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$	tepelný odpor ze strany vzduchu u trubky
$R_{4,i}$	$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$	tepelný odpor ze strany vzduchu i-té stěny
R_c	$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$	celkový tepelný odpor
$R_{c,i}$	$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$	celkový tepelný odpor i-té stěny
Ra	–	Rayleighovo číslo
Re	–	Reynoldsovo číslo
S	m^2	obsah stěny
$t_{\text{in,potrubí}}$	$^{\circ}\text{C}$	teplota na vstupu do trubky
$t_{\text{in,pračka}}$	$^{\circ}\text{C}$	teplota na vstupu do pračky
$t_{\text{konečná}}$	$^{\circ}\text{C}$	teplota vody po průchodu jednoho vzorku plynu
t_{ok}	$^{\circ}\text{C}$	teplota okolí

$t_{\text{out,potrubí}}$	$^{\circ}\text{C}$	teplota na výstupu z trubky
$t_{\text{out,pračka}}$	$^{\circ}\text{C}$	teplota na výstupu z pračky
$t_{\text{stř,potrubí}}$	$^{\circ}\text{C}$	střední teplota plynu v trubce
$t_{\text{stř,pračka}}$	$^{\circ}\text{C}$	střední teplota plynu v pračce
$t_{\text{urč}}$	$^{\circ}\text{C}$	určovací teplota
t_{voda}	$^{\circ}\text{C}$	teplota vypírací vody
$T_{\text{stř,potrubí}}$	K	střední termodynamická teplota plynu v trubce
$T_{\text{stř,pračka}}$	K	střední termodynamická teplota plynu v pračce
ΔT	K	teplotní rozdíl
ΔT_{ln}	K	střední teplotní logaritmický spád
V	m^3	objem plynu
$x_{\text{m,i}}$	—	hmotnostní podíl složky plynu

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Schéma zplyňování [54]	17
Obr. 2.2 Schéma autotermního a alotermního zplyňování [68]	18
Obr. 2.3 Zplyňovací reaktory s pevným ložem – zleva: souproudý, protiproudý, s křížovým tokem [9].....	21
Obr. 2.4 Zplyňovací reaktory s fluidní vrstvou – zleva: se stacionární fluidní vrstvou, s cirkulující fluidní vrstvou [10].....	21
Obr. 4.1 Transformace dehtu v závislosti na teplotě [23]	25
Obr. 5.1 Schéma sprchové věže [44]	33
Obr. 5.2 Schéma pěnového (patrového) odlučovače [45].....	34
Obr. 5.3 Schéma Venturiho pračky [44]	35
Obr. 6.1 Schéma cyklónového odlučovače [48]	36
Obr. 6.2 Schéma elektrostatického odlučovače [34].....	38
Obr. 6.3 Schéma mokré vápencové vypírky [58]	42
Obr. 6.4 Schéma polosuché metody odsíření [60]	43
Obr. 7.1 Schéma odběrové trati dle Tar protocol [62]	45
Obr. 7.2 Schéma upravené odběrové trati [54]	45
Obr. 7.3 Reálná odběrová trať	46
Obr. 7.4 Chladicí zařízení současně chladicí odběry před pračkou i za pračkou.....	46
Obr. 7.5 Provádění odběrů plynů pomocí vzorkovnice	47
Obr. 7.6 Vzorkovnice obsahující vzorky plynu	47
Obr. 7.7 Schéma zplyňovacího zařízení Biofluid [63].....	48
Obr. 7.8 Provedení odběru plynu ze zplyňovacího zařízení: A – přívodní potrubí, B – ventil, C – filtr tuhých nečistot, D – výstup plynu z filtru.....	68
Obr. 7.9 Graf průběhu teplot 18.4.2018	69
Obr. 7.10 Graf průběhu teplot 19.4.2018	70
Obr. 8.1 Vzorky dehtu před pračkou (vlevo) a za pračkou (vpravo)	72
Obr. 8.2 Účinnost odstranění jednotlivých složek při teplotě 2 °C.....	74
Obr. 8.3 Složení dehtu před pračkou při teplotě 2 °C	74
Obr. 8.4 Složení dehtu za pračkou při teplotě 2 °C.....	75
Obr. 8.5 Účinnost odstranění jednotlivých složek při teplotě 20 °C.....	77
Obr. 8.6 Složení dehtu před pračkou při teplotě 20 °C	77
Obr. 8.7 Složení dehtu za pračkou při teplotě 20 °C.....	78
Obr. 8.8 Účinnost odstranění jednotlivých složek při teplotě 40 °C.....	80
Obr. 8.9 Složení dehtu před pračkou při teplotě 40 °C	80
Obr. 8.10 Složení dehtu za pračkou při teplotě 40 °C.....	81
Obr. 8.11 Závislost účinnosti odstranění dehtu na teplotě prací kapaliny	81
Obr. 8.12 Účinnosti odstranění jednotlivých složek v závislosti na teplotě.	82

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Porovnání složení a výhřevnosti generovaného plynu při použití různých zplyňovacích médií [7].....	18
Tab. 3.1 Složení vysokopecního plynu [14]	22
Tab. 3.2 Složení svítiplynu [14]	23
Tab. 3.3 Složení koksárenského plynu [14]	23
Tab. 3.4 Složení bioplynů [14]	24
Tab. 7.1 Zadané hodnoty	50
Tab. 7.2 Předpokládané složení generovaného plynu	50
Tab. 7.3 Základní vlastnosti generovaného plynu	52
Tab. 7.4 Teplo odevzdané plynem.....	53
Tab. 7.5 Reynoldsova čísla pro jednotlivé stavy	54
Tab. 7.6 Součinitel přestupu tepla ze strany plynu.....	54
Tab. 7.7 Tepelný odpor ze strany plynu	55
Tab. 7.8 Součinitel přestupu tepla ze strany vzduchu	56
Tab. 7.9 Tepelný odpor ze strany vzduchu.....	57
Tab. 7.10 Celkový tepelný odpor trubky	57
Tab. 7.11 Tepelné ztráty na metr trubky	57
Tab. 7.12 Délka potrubí pro jednotlivé teploty plynu a okolí pro průtok 10 l·min ⁻¹	58
Tab. 7.13 Délka potrubí pro jednotlivé teploty plynu a okolí pro průtok 11 l·min ⁻¹	58
Tab. 7.14 Délka potrubí pro jednotlivé teploty plynu a okolí pro průtok 12 l·min ⁻¹	59
Tab. 7.15 Délka potrubí pro jednotlivé teploty plynu a okolí pro průtok 13 l·min ⁻¹	59
Tab. 7.16 Délka potrubí pro jednotlivé teploty plynu a okolí pro průtok 14 l·min ⁻¹	59
Tab. 7.17 Známé hodnoty	60
Tab. 7.18 Měrná tepelná kapacita a hustota plynu při vstupu do pračky	61
Tab. 7.19 Teplo obsažené v plynu	62
Tab. 7.20 Tepelný odpor ze strany vzduchu pro boční stěnu 0,75·0,45 m.....	64
Tab. 7.21 Tepelný odpor ze strany vzduchu pro boční stěnu 0,45·0,15 m.....	64
Tab. 7.22 Tepelný odpor ze strany vzduchu pro boční stěnu 0,75·0,15 m.....	65
Tab. 7.23 Tepelný odpor ze strany vody pro boční stěnu 0,75·0,45 m	65
Tab. 7.24 Tepelný odpor ze strany vody pro boční stěnu 0,45·0,15 m	65
Tab. 7.25 Tepelný odpor ze strany vody pro boční stěnu 0,75·0,15 m	66
Tab. 7.26 Tepelné odpory skleněné stěny a polystyrenové izolace.....	66
Tab. 7.27 Celková tepelná ztráta mokré pračky	67
Tab. 7.28 Konečná teplota vody v mokré pračce	67
Tab. 8.1 Složení plynu před a za pračkou 18.4.2018 v 15:00	71
Tab. 8.2 Složení dehtu před a za pračkou a účinnost pračky při teplotě prací vody 2 °C	73
Tab. 8.3 Složení dehtu před a za pračkou a účinnost pračky při teplotě prací vody 20 °C	76
Tab. 8.4 Složení dehtu před a za pračkou a účinnost pračky při teplotě prací vody 40 °C	79
Tab. 8.5 Účinnost odstranění složek pro různé teploty vody	82

SEZNAM PŘÍLOH

Výpočet délky přívodní trubky a změny teploty vody v pračce