



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**ATMOSFERICKÉ ZPLYŇOVÁNÍ BIOMASY S
PŘÍDAVKEM KYSLÍKU A VODNÍ PÁRY**

ATMOSPHERIC GASIFICATION OF BIOMASS BY THE ADDITION OF OXYGEN AND STEAM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Veronika Vyušťáková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Studentka:	Bc. Veronika Vypušťáková
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Energetické inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

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:

Atmosferické zplyňování biomasy s přidavkem kyslíku a vodní páry

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Náplň diplomové práce spočívá v popsání procesu zplyňování biomasy se směsí kyslíku a vodní páry. Práce se bude věnovat rešerši využití kyslíku pro zplyňování, návrhu experimentů pro ověření teorie, provedení základních experimentů a shrnutí. Práce je vhodná pro studenty se vztahem k experimentům.

Cíle diplomové práce:

- popis fluidního zplyňování biomasy a používaných zařízení
- rešerše možných zplyňovacích médií a jejich vlivu na proces a výstupy zplyňování
- návrhu experimentů zplyňování dřevní biomasy se vzduchem s přidavkem vodní páry a kyslíku
- provedení a vyhodnocení experimentů

Seznam doporučené literatury:

BASU, Pabir. Combustion and Gasification in Fluidised Beds. CRC Press 2006, 1. vyd, 470 s., ISBN 0-8493-3396-2

KLASS, Donald L. Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals. Academic Press, 1998, London, UK, 651 str., ISBN 0-12-410950-0

KNOEF, H. A. M. Handbook biomass gasification. BTG biomass technology group, Enschede, 2005. ISBN 90-810068-1-9

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tématem této diplomové práce je atmosferické zplyňování biomasy s přidavkem kyslíku a vodní páry. Teoretická část je věnována popisu biomasy, procesu zplyňování, typům reaktorů a vyprodukovanému plynu. Dále jsou navrženy experimenty v závislosti na zplyňovacím médiu a na výstupní teplotě. Klíčovým aspektem je v tomto případě regulace přidavku vodní páry. V praktické části jsou tyto experimenty provedeny na fluidním reaktoru. Výsledné hodnoty ze vzorků plynu a dehtu jsou následně zpracovány a vyhodnoceny.

Klíčová slova

Zplyňování, biomasa, zplyňovací reaktory, zplyňovací médium, vodní pára, energoplyn, dehet

ABSTRACT

The topic of master's thesis is atmospheric gasification of biomass by the addition of oxygen and steam. The theoretical part is devoted to the description of biomass, process of gasification, kinds of gasification reactor and product gas. Further experiments are devised depending on the gasification medium and output temperature. In this case, the key aspect is the steam addition control. In the practical part, these experiments are performed in a fluidized bed reactor. Resulting values from samples of gas and tar are subsequently processed and evaluated.

Key words

Gasification, biomass, gasification reactor, gasification medium, steam, syngas, tar

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VYPUŠŤÁKOVÁ, V. *Atmosferické zplyňování biomasy s přidávkem kyslíku a vodní páry*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 71 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Atmosferické zplyňování biomasy s přidavkem kyslíku a vodní páry** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Veronika Vypušťáková

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych ráda poděkovala doc. Ing. Marku Balášovi, Ph.D. za odborné vedení mé diplomové práce, cenné připomínky a rady při konzultacích. Poděkování rovněž patří všem, kteří se podíleli na experimentálním měření. A v neposlední řadě bych chtěla poděkovat svým rodičům za jejich podporu při celém mém studiu.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Biomasa	12
1.1 Vlastnosti biomasy.....	13
1.2 Zpracování biomasy.....	14
2 Zplyňování biomasy	16
2.1 Proces zplyňování	16
2.2 Fáze zplyňování	17
2.3 Účinnost	18
3 Zplyňovací reaktory (generátory).....	20
3.1 Zplyňovací reaktor s pevným ložem.....	21
3.2 Zplyňovací reaktor s fluidním ložem.....	22
3.3 Reaktor s unášivým proudem	23
4 Vyrobený plyn	24
4.1 Nečistoty v plynu	24
4.1.1 Pevné částice	25
4.1.2 Alkalické sloučeniny	25
4.1.3 Dehty	25
4.1.4 Dusíkaté sloučeniny	26
4.1.5 Síra	26
4.1.6 Chlór.....	26
4.2 Čištění plynu	27
4.2.1 Čištění částic	27
4.2.2 Čištění dehtů.....	28
4.2.3 Čištění ostatních nečistot.....	28
4.3 Využití plynu	29
4.3.1 Pára.....	29
4.3.2 Výroba elektrické energie a tepla.....	30
4.3.3 Dopravní paliva	30
4.3.4 Hnojiva	30
5 Zplyňovací médium.....	31
5.1.1 Vzduch	31
5.1.2 Kyslík	31
5.1.3 Pára.....	32
6 Návrh experimentu	35
6.1 Popis zařízení.....	35
6.2 Palivo	36
6.3 Zplyňovací médium	36
6.4 Měření.....	37

6.4.1	Měřené veličiny.....	37
6.4.2	Odběr plynu.....	37
6.4.3	Dehet.....	38
7	Experiment.....	41
7.1	Průběh.....	41
7.2	Experimentální podmínky.....	42
7.3	Palivo.....	43
7.4	Složení plynu.....	45
7.4.1	Off-line analýza.....	45
7.4.2	On-line analýza.....	45
7.4.3	Vliv množství vodní páry H ₂ O.....	46
7.4.4	Vliv teploty.....	49
7.5	Dehet.....	52
7.5.1	Analýza dehtu.....	52
7.6	Účinnosti.....	55
7.7	Poměr pára/biomasa (steam to biomass).....	60
	ZÁVĚR.....	63
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	66
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	68
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	70
	SEZNAM TABULEK.....	71

ÚVOD

Současným globálním problémem je znečištění životního prostředí škodlivými látkami. Mimo přírodních zdrojů znečišťujících látek zde hraje velkou roli především antropogenní vliv. Tyto škodliviny kromě jiných způsobů vznikají spalováním fosilních paliv. Pro snížení celkových emisí jsou čím dál více diskutované alternativní a obnovitelné zdroje energie a jejich ekologičtější využití v praxi.

Mezi obnovitelné zdroje patří například solární, vodní, větrná energie a další. Kromě snižování škodlivin přispívají i k šetření primárních zdrojů (uhlí, ropa atd.). Tato diplomová práce bude věnována biomase jako obnovitelnému zdroji energie, ale především jejímu procesu zplyňování. Konkrétně jde o atmosferické zplyňování biomasy s přidavkem kyslíku a vodní páry na energeticky využitelný plyn.

První část této práce bude věnována odbornému popisu biomasy a jejímu možnému zpracování. Dále bude podrobněji rozebrán thermochemický proces zplyňování a typy zplyňovacích reaktorů. Následně bude popsán plyn, jakožto produkt tohoto procesu, jeho složení a obsahující nečistoty s jejich eliminací.

Na průběh zplyňování a jeho výstup má vliv použité zplyňovací médium. Mezi tato zplyňovací činidla patří nejčastěji vzduch, ale i kyslík O_2 , vodní pára H_2O , oxid uhličitý CO_2 a jejich směsi. Pro tuto práci bude s těžejší obohacení vzduchu o kyslík s regulovaným množstvím hmotnostního toku vodní páry.

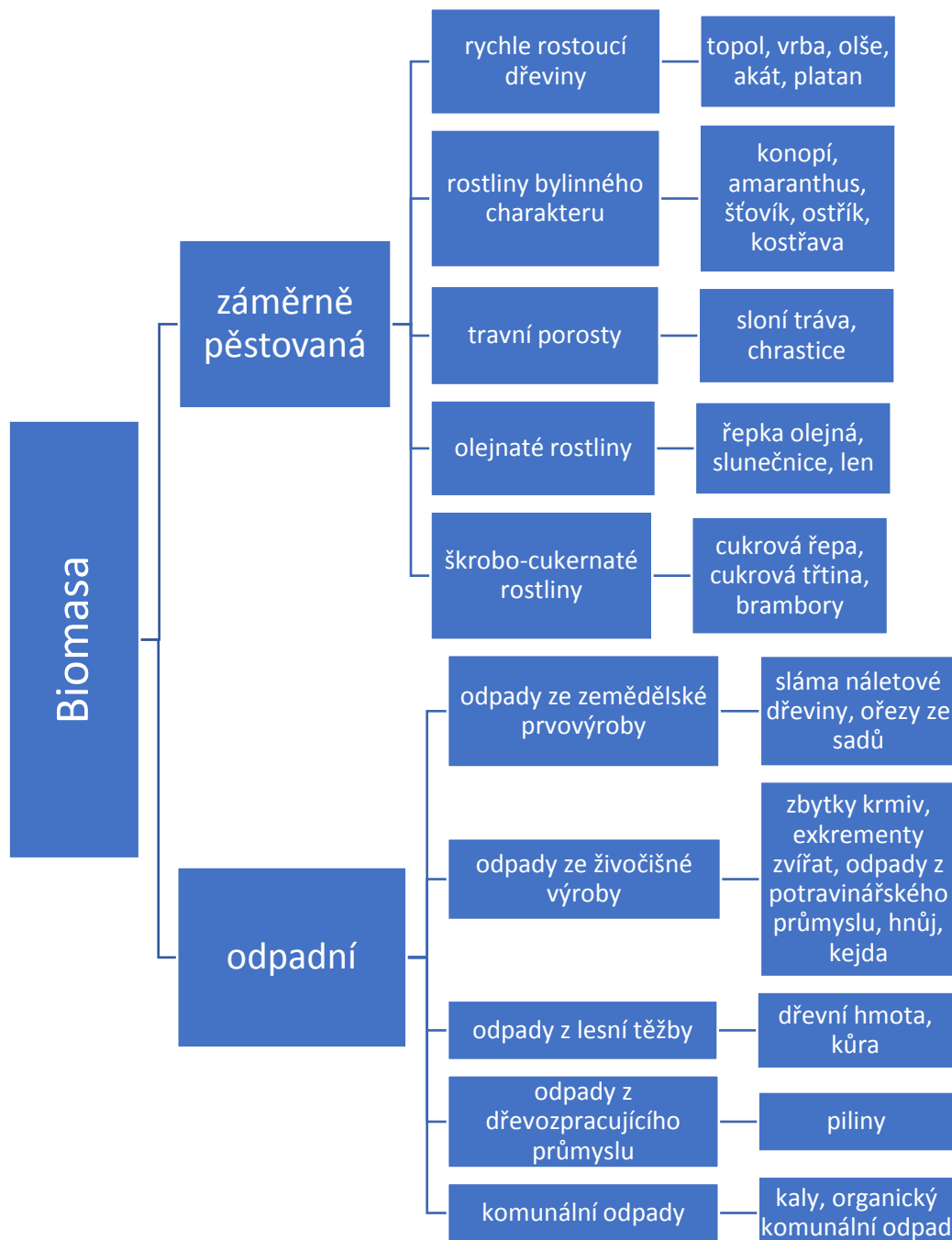
V další části budou uvedeny návrhy experimentů zplyňování dřevní biomasy. Bude se jednat o hodnoty regulovaných množství vodní páry vháněných do reaktoru, jak již bylo naznačeno. Mimo hmotnostního toku H_2O budou navrženy a zkoumány i výstupní teploty.

Na základě návrhů podmínek zplyňování budou provedeny experimenty na fluidním zařízení Biofluid 100, který se nachází na Energetickém ústavu VUT v Brně. Tento reaktor je v provozu již od roku 2000. Budou odebírány on-line i off-line vzorky plynu a dehtu podle Tar protocolu.

Po provedení experimentu budou naměřené a zanalyzované hodnoty zpracovány. Bude zkoumán vliv přidavků vodní páry a vliv teploty na složení vyrobeného energoplynu, tvorbu dehtů a důležitých parametrů. Na konec budou tyto výsledky vyhodnoceny.

1 Biomasa

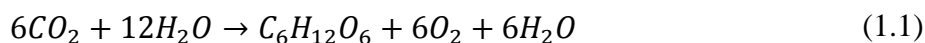
Biomasa je veškerá organická hmota rostlinného nebo živočišného původu patřící mezi obnovitelné zdroje energie. Je to všestranná surovina, která přispívá k celkovému snížení emisí obecně. Biomasa pro energetické využití může být odpadní (zemědělství, průmysl, domácnosti) nebo záměrně pěstovaná (energetické rychlerostoucí rostliny).
[3][4][12]



Obrázek 1 Rozdělení biomasy [4]

Využívání biomasy jakožto obnovitelného zdroje energie, vede ke snížení produkce skleníkových plynů. Z hlediska emisí oxidu uhličitého je neutrální, díky schopnosti

fotosyntézy. Při spalování biomasy vzniká oxid uhličitý, ale přibližně stejné množství tohoto skleníkového plynu z atmosféry biomasa spotřebovala právě fotosyntézou při svém růstu. ^{[11][12]}



1.1 Vlastnosti biomasy

Vlastnosti biomasy hrají při zplyňování důležitou roli. Z hlediska energetického využívání patří mezi nejdůležitější vlastnosti biomasy: ^[3]

- Hrubý rozbor paliva
- Prvkové a biochemické složení
- Výhřevnost, spalné teplo

Její složení lze teoreticky určit hrubým rozбором paliva, přičemž lze zjistit poměr vody, popeloviny a hořlaviny. ^[3]

$$h + A^r + W^r = 100 \% \quad (1.2)$$

Zásadní je podíl vlhkosti biomasy, který je velmi kolísavý. Je preferovaná suchá biomasa pro lepší kvalitu vyrobeného plynu zplyňováním. Biomasu lze vysušit. Přírodní sušení je sice levné, ale zabere více času na rozdíl od umělého sušení, které je dražší, ale efektivnější. ^{[13][20]}

Obsah popeloviny v biomase bývá nízký, i přesto ovlivňuje konstrukci reaktoru a tavící chování popela. U biomasy s minerály s nízkým bodem tání mohou nastat problémy s tavením kolem teploty 850 °C ^[13]. Řešením je vysokoteplotní zplyňování, čímž se odstraní minerály ve formě strusky. ^{[13][20]}

Prvkové složení biomasy je obecně uvedeno v tabulce. Největší procentuální podíl je zastoupen uhlíkem a kyslíkem, a pak vodíkem.

Tabulka 1 Prvkový rozbor biomasy ^[11]

Prvek	Podíl [%hm.]
C	44-51
H	5,5 - 6,7
O	41-50
N	0,12 - 0,6
S	0 - 0,2

Výhřevnost a spalné teplo biomasy závisí na jejím elementárním složení a na hrubém rozboru paliva. Biomasa má nízký obsah dusíku a síry. Další vlastností biomasy, na které záleží, je sypaná hmotnost a její morfologie. Ovlivňuje to manipulaci, dopravu a skladování. Je to důležité především pro reaktory s pevným ložem. Reaktor s fluidním ložem je flexibilnější. Vliv na množství dehtu, provozní podmínky a konstrukci reaktoru má rovněž obsah těkavých látek. ^[13]

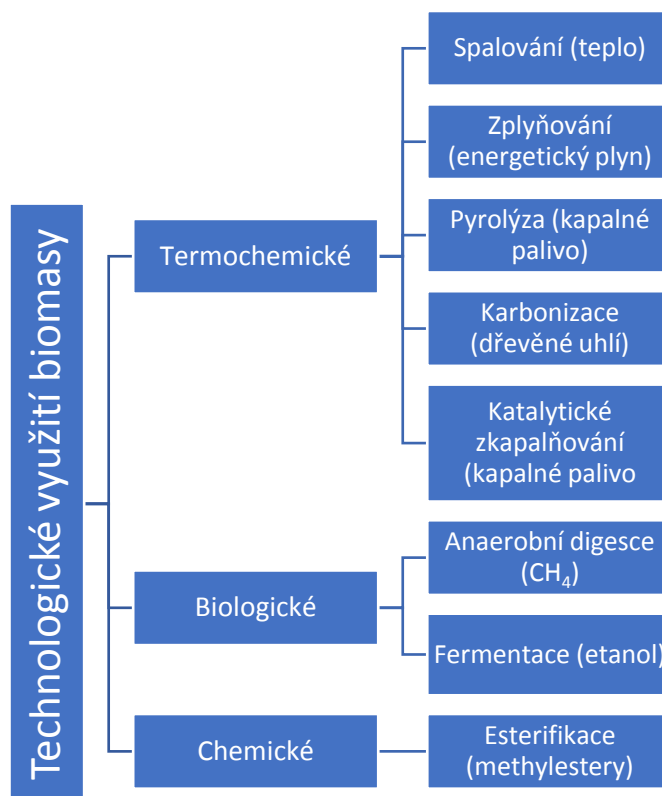
Spalné teplo je teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na 20 °C, přičemž voda ve spalinách je v kapalně fázi. Lze ho změřit pomocí kalorimetru. ^[3]

Výhřevnost je teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na 20 °C, přičemž voda ve spalinách je v plynné fázi. Vypočítá se vztahem: ^[3]

$$Q_i^r = Q_s - r \cdot (W^r + 8,94 \cdot H_2) \quad (1.3)$$

1.2 Zpracování biomasy

Energii z biomasy lze získat termochemickými nebo biochemickými procesy. Mezi termochemické (suché) procesy patří klasické spalování, zplyňování atd. K biochemickým (mokrým) procesům se řadí například fermentace a vyhnívání. Při těchto přeměnách je aplikován první termodynamický zákon. ^{[11][14]}



Obrázek 2 Přehled technologických zpracování biomasy ^[11]

Spalování lze z chemického hlediska popsat jako exotermickou přeměnu organických paliv za dostatečného přístupu kyslíku. Palivo reagující s okysličovadlem způsobuje uvolňování energie. Při spalování je potřeba co nejlépe optimalizovat podmínky. Závisí na typu spalované biomasy a jejich vlastnostech, na přívodu spalovacího vzduchu, na snižování škodlivých látek odcházejících z komína a jiné. Spalovací proces probíhá za přebytku vzduchu, díky kterému se dosahuje co možná nejdokonalějšího spalování. Tendencí je rovněž zvyšovat účinnost a snižovat náklady s tímto spojené. ^[11]

Palivem pro zplyňovací proces bývá nejčastěji dřevní hmota. Hlavním faktorem je složení dané biomasy. U fluidních generátorů je vhodná forma stébelnin v podobě pelet. Více o zplyňování v následujících kapitolách. ^[11]

Tabulka 2 Výhody a nevýhody zplyňování oproti spalování [22]

Výhody	Nevýhody
Úspora primárních paliv Dosažení větší přeměny paliva na elektrickou energii Nižší provozní náklady Rozměry technologického zařízení Produkce plynu s velkým měrným objemem Snadnější odstraňování škodlivin Nevznikají tuhé emise spalováním plynu Možnost dosažení vyšších teplot spalování plynu Rovnoměrný ohřev ploch při spalování plynu Lepší regulace při spalování plynu Přímé spalování plynu v tepelných strojích Využití alternativních paliv Snížení produkce škodlivin při spalování plynu	Nutnost čištění plynu Vyšší investiční náklady Inovativní technologie

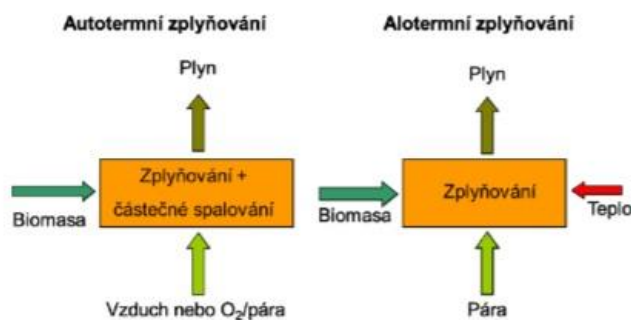
2 Zplyňování biomasy

2.1 Proces zplyňování

Zplyňování je termochemická přeměna z tuhého skupenství, příp. kapalného, na plynné v podobě výhřevného energetického plynu. Tento proces probíhá za pomoci zplyňovacích médií (kyslík, vzduch, vodní pára, jejich kombinace) a tepla. Lze tuto přeměnu popsat čtyřmi fázemi, které mohou probíhat postupně nebo souběžně. Jedná se o: ^{[2][11]}

- 1) Sušení
- 2) Pyrolýzu
- 3) Redukci
- 4) Oxidaci

Průběh zplyňování je poměrně složitý. Zplyňování probíhá za přítomnosti tepla. Sušení, pyrolýza a redukce jsou reakce endotermní, tudíž teplo spotřebovávají. Rozlišuje se autotermní a alotermní zplyňování. ^[8]



Obrázek 3 Schéma Autotermního a alotermního zplyňování ^[8]

Při **autotermním** zplyňování, nebo-li přímém, je potřebné teplo dodáno spalováním části paliva přímo v reaktoru. Spaluje se přibližně 20-25 % hm ^[23]. paliva v reaktoru pro pokrytí tepelných nároků. Do zařízení musí být dodáván kyslík kvůli exotermním reakcím. Obvykle bývá používán vzdušný kyslík, který ovšem způsobuje naředění produkovaného plynu dusíkem ze vzduchu, což vede ke snížení jeho výhřevnosti. Při tomto typu zplyňování má vyprodukovaný plyn výhřevnost 2,5-8,0 MJ/m³ ^[23]. ^{[8][22][23]}

Naproti **alotermní** přeměně, nebo-li nepřímé, se teplo přivádí do reaktoru z okolí. Teplo zvenku může být dodáváno transportem tepla teplosměnnou plochou, transportem tepla obsaženého v inertním materiálu nebo prostřednictvím vstupních materiálů. ^{[8][22][23]}

Výroba plynu zplyňováním biomasy je sice složitý proces, ale díky tomu lze využívat tento plyn pro čisté a efektivní spalování. Je možné jej dopravovat potrubím. Existuje celá řada využití tohoto zplyňovacího produktu. ^[13]

2.2 Fáze zplyňování

Zplyňování obecně zahrnuje procesy sušení, pyrolýzy, oxidace a redukce. Tyto fáze mohou probíhat postupně v případě reaktoru s pevným ložem. U reaktoru s fluidním ložem probíhají současně a nelze je tedy rozdělit. ^[21]

Cílem sušení paliva je odpaření vázané vody. Ideální vlhkost paliva je asi 15 % ^[21]. Dochází k odtoku veškeré vody a nejprchavějších podílů hořlaviny. Vypařená voda může odcházet společně s vyrobeným plynem nebo reagovat v redukční fázi. ^{[8][21]}

Při pyrolýze dochází k tepelnému rozkladu biomasy jako paliva, a to bez přístupu oxidačního média (vzduch, kyslík). Tepelným rozkladem paliva vznikají plynné složky, kondenzující páry a polokoks. Následně dochází k tepelnému štěpení par na plyn a pevný uhlík. Vznik produktů pyrolýzy závisí na chemickém složení paliva a na podmínkách pyrolýzy. Tyto produkty mohou být tuhé, kapalné i plynné. Poměr produktů je závislý na rychlosti ohřevu vstupního média a na konečné teplotě. ^{[11][21]}

V oxidačním pásmu probíhá částečná oxidace hořlavých plynů, složek a pevného uhlíku. Do této oblasti je přiváděno zplyňovací médium. Díky této exotermické reakci je vzniklé teplo dodáváno endotermické reakci. Tyto procesy lze popsat chemickými rovnicemi: ^[21]

- 1) Částečná oxidace pevného uhlíku: $C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$ $\Delta H = -111 \text{ kJ/mol}$
- 2) Úplná oxidace pevného uhlíku: $C + O_2 \rightarrow CO_2$ $\Delta H = -394 \text{ kJ/mol}$
- 3) Oxidace oxidu uhelnatého CO: $CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$ $\Delta H = -283 \text{ kJ/mol}$
- 4) Oxidace vodíku H_2 : $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$ $\Delta H = -242 \text{ kJ/mol}$
- 5) Oxidace metanu CH_4 : $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$ $\Delta H = -802 \text{ kJ/mol}$

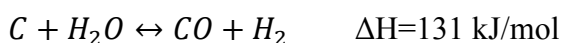
kde ΔH je reakční teplo, které soustava vydá nebo přijme. Je vázáno na normální podmínky, tedy na teplotu $T=0 \text{ }^\circ\text{C}$ a tlak $p=101,325 \text{ kPa}$. ^[11]

Při redukci je zplyňován pevný uhlík párou nebo oxidem uhličitým CO_2 . V této fázi chemické reakce probíhají bez přítomnosti kyslíku. Tím se teplota vyráběného plynu snižuje a většina uhlíku je spálena, zredukována na oxid uhelnatý CO nebo odchází v popelu jako nedopal. Děje v této oblasti opět lze popsat pomocí chemických rovnic: ^[21]

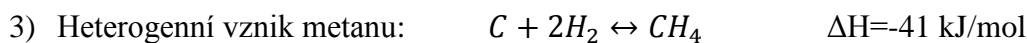
- 1) Boudouarova reakce: $C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$ $\Delta H = 173 \text{ kJ/mol}$

Boudouarovy reakce jsou mnohem pomalejší než předchozí oxidační. Probíhají za nepřítomnosti katalyzátoru při vyšších teplotách ($700 \text{ }^\circ\text{C}$) a za nižších tlaků. Jejich produktem je plyn, dehet a popel. Tyto reakce řídí konečnou přeměnu polokoksu a produkty této reakce převládají v konečném složení plynu. ^[11]

- 2) Heterogenní reakce vzniku vodního plynu:



Tato reakce má za následek zvýšení poměru vodíku a oxidu uhelnatého ve vyprodukovaném plynu. Optimální teplotní podmínky za přítomnosti katalyzátorů jsou kolem 260 °C. ^[11]



Methanizační reakce probíhá pomalu obvykle za nízkých teplot bez přítomnosti katalyzátoru. K urychlení reakce je ale možné použít niklový katalyzátor, zvýšit teplotu (1100 °C) a tlak (6–8 bar). Tato reakce je upřednostňována zejména, když produkty zplyňování jsou použity jako výchozí produkty pro další chemické procesy. ^[11]

2.3 Účinnost

Energetická účinnost zplyňování se pohybuje mezi 70-90 %. Na rozdíl od klasického spalování biomasy má zplyňovací proces menší tepelné ztráty. ^[2]

Jedná se o účinnost termochemické přeměny z pevného paliva (biomasy) na plynné. Výpočet účinnosti tohoto procesu je dán vztahem: ^[16]

$$\eta = \frac{\dot{V}_{\text{plyn}} \cdot Q_{i,\text{plyn}}^r}{\dot{m}_{\text{pal}} \cdot Q_{i,\text{pal}}^r} \quad (2.1)$$

Kde: \dot{V}_{plyn} – objemový tok plynu [m^3/h]

$Q_{i,\text{plyn}}^r$ – výhřevnost plynu [MJ/m^3]

\dot{m}_{pal} – hmotnostní tok paliva (biomasy) [kg/h]

$Q_{i,\text{pal}}^r$ – výhřevnost paliva (biomasy) [MJ/kg]

Objemový tok se přepočítá z hmotnostního toku plynu určeného z hmotnostní bilance zplyňovacího zařízení. ^[16]

$$\dot{m}_{\text{pal}} + \dot{m}_{\text{media}} = \dot{m}_{\text{plyn}} + \dot{m}_{\text{uhlík}} \quad (2.2)$$

$$\dot{m}_{\text{plyn}} = \dot{m}_{\text{palivo}} + \dot{m}_{\text{media}} - \dot{m}_{\text{uhlík}}$$

Kde: \dot{m}_{pal} – hmotnostní tok paliva (biomasy) [kg/h]

\dot{m}_{plyn} – hmotnostní tok plynu [kg/h]

\dot{m}_{media} – hmotnostní tok zplyňovacího média (vzduch + O_2 + H_2O) [kg/h]

$\dot{m}_{\text{uhlík}}$ – hmotnostní tok uhlíku z prchavé hořlaviny paliva (5-10 %) [kg/h]

Účinnost zplyňování může být vyjádřena jako celková účinnost generátoru nebo účinnost výroby chladného plynu. Celková účinnost generátoru je poměrem celkové energie výstupních proudů na výstupu z generátoru ku celkové energii vstupních proudů. Účinnost výroby chladného plynu je podílem chemické energie plynu na výstupu a chemické energie na vstupu do generátoru za normálních podmínek. Se stoupající teplotou reaktoru se snižuje účinnost výroby chladného plynu. ^[8]

Výtěžek plynu je poměr objemového toku plynu ku hmotnostnímu toku paliva. Je dán vztahem: ^[8]

$$Y = \frac{\dot{V}_{\text{plyn}}}{\dot{m}_{\text{pal}}} \left[\frac{m_n^3}{kg} \right] \quad (2.3)$$

Kde: Y – Výtěžek plynu [m_n^3/kg]

\dot{V}_{plyn} – objemový tok plynu [m_n^3/h]

\dot{m}_{pal} – hmotnostní tok paliva (biomasy) [kg/h]

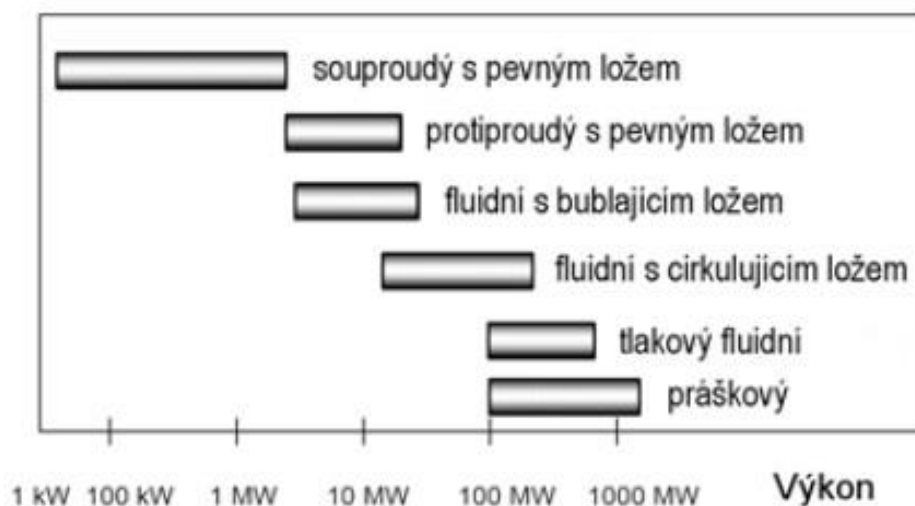
Výtěžek plynu roste se zvyšující se teplotou. Obecně platí, že čím vyšší výtěžek plynu, tím je větší výhřevnost. ^[2]

3 Zplyňovací reaktory (generátory)

Zplyňovací reaktory, nebo-li generátory, jsou zařízení sloužící k přeměně tuhého paliva na plyn. Zplyňovací reaktory rozlišujeme podle různých faktorů: ^{[13][21][22]}

- 1) konstrukce reaktoru
 - a) s pevným ložem – souproudé, protiproudé, s křížovým tokem
 - b) s fluidním ložem
 - c) s unášivým ložem
- 2) podle zplyňovacího média
 - a) parní
 - b) parokyslíková směs
 - c) kyslíkové
 - d) vzduchové
- 3) podle zdroje tepla
 - a) autotermní (přímý) – teplo dodáno spalováním části biomasy
 - b) kyslíkové
 - c) alotermní (nepřímý) – teplo dodáváno nepřímým ohřevem
- 4) podle tlaku v reaktoru
 - a) atmosferické
 - b) tlakové

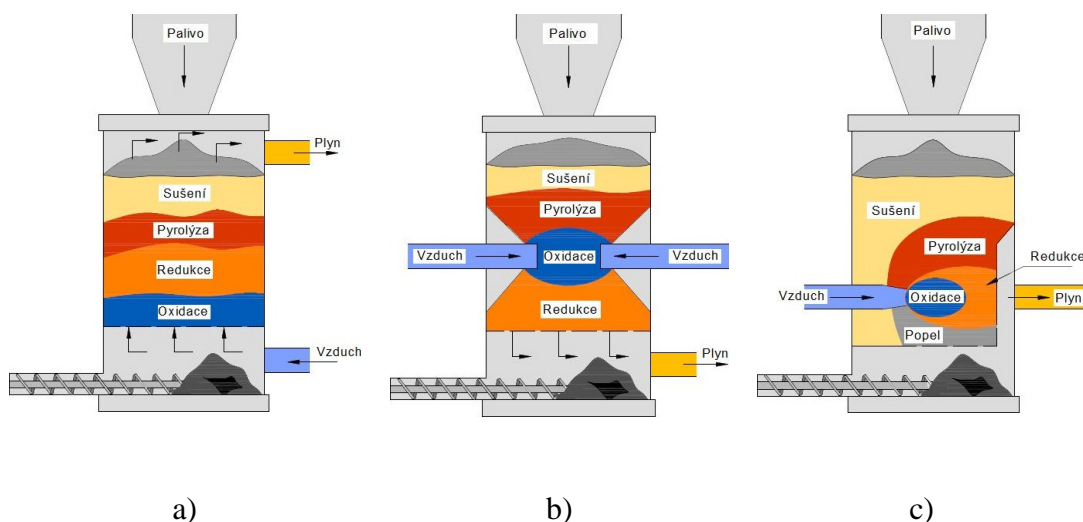
Každý typ zplyňovacího generátoru funguje na určitém principu, a tak má rozdílné požadavky na parametry. ^[8]



Obrázek 4 Orientační výkon zplyňovacích reaktorů ^[19]

3.1 Zplyňovací reaktor s pevným ložem

Zplyňovací reaktor s pevným ložem je jeden z nejrozšířenějších typů. Potřebné teplo pro zplyňovací proces lze přivádět přímo (autotermně) i nepřímě (alotermně). Obecně je rozlišujeme podle proudění plynu na souprůdné (klesající proudění), protiprůdné (vzestupné proudění) reaktory s pevným ložem a s křížovým prouděním. [13][21]



Obrázek 5 Schéma a) protiprůdného, b) souprůdného, c) křížového reaktoru s pevným ložem [21]

Protiprůdný reaktor je nejjednodušší z hlediska techniky. Pracuje na takovém principu, kdy palivo je přiváděno z horní části a pohybuje se směrem dolů, zatímco za přívodu předehřátého zplyňovacího média s volným kyslíkem O_2 vzniká plyn proudící proti směru, tedy nahoru. Plyn postupně prochází zplyňovacími fázemi, ve kterých odevzdává část svého tepla, a tím se ochlazuje. Mimo to pohlcuje produkty pyrolýzy a vodní páru. Plusem u tohoto typu reaktoru je možnost zplyňování paliv s vyšším obsahem vlhkosti a použití různých druhů paliv. Umožňuje dosahovat maximální účinnosti a co největšího využití tepla díky vnitřní výměně tepla. Má zpravidla malé tlakové ztráty, dobrou termickou účinnost a malou tendenci k tvoření škváry. Problémem je vyšší obsah škodlivých látek a pyrolýzních produktů v plynu a vznik nízkovýhřevného plynu při relativně dlouhém náběhu zařízení. Vyznačuje se citlivostí na vlhkost v palivu a špatnou reakcí na velkou zátěž. [8][11][21]

U **souprůdného reaktoru** je palivo rovněž přiváděno do horní části. Na rozdíl od protiprůdného ovšem plyn proudí ve stejném směru jako palivo. Vzduch je v tomto případě přiváděn buď z boku nebo z vrchu. Jako směr proudění plynu se liší i pořadí zplyňovacích zón. Množství pyrolýzních produktů vznikajících v pyrolýzně-oxidační oblasti klesá, protože v redukčním pásmu se na rozžhaveném uhlí štěpí. Výhodou je malá citlivost na prach živočišného uhlí a dehtu v palivu. Je poměrně flexibilní vůči přizpůsobení se zátěži. Nevýhodou vyrobeného plynu je jeho vyšší teplota a obsah prachových částic. Zařízení je citlivé na velikosti vstupního paliva a jeho vlhkosti. Má docela vysokou konstrukci. [11][21]

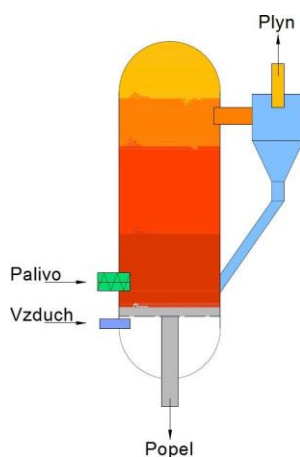
Reaktor s křížovým tokem má malý rozsah pracovního výkonu a vysoké teploty. Je určen především pro zplyňování dřevěného uhlí. Výhodou je jednoduché čištění plynu (filtr, cyklon). Má malou výšku konstrukce a krátkou dobu najíždění. Nevýhodou jsou vysoké nároky na kvalitu dřevěného uhlí. Je citlivý na tvorbu škváry a má velké tlakové ztráty. Vysoké teploty mohou způsobit problémy s konstrukčním materiálem. ^{[11][21]}

Provozní problémy spojené s reaktory s pevným ložem jsou problémy s ucpáváním kvůli malým částicím, což zvyšuje tlakové ztráty. To může být důsledkem nevhodné kombinace vlastností paliva. Neexistuje reaktor s pevným ložem, který by produkoval plyn bez dehtu. Je to způsobené opět vlastnostmi paliva nestabilním provozem nebo příliš nízkým zatížením. Pro zamezení možného výbuchu způsobeného únikem hořlavých plynů je potřeba odvodu zplyňovací zařízení po jeho odstavení. Prevencí je pružinové vrchní víko, umístění v dobře větraných prostorech nebo na volném prostranství. Zejména ve vysokoteplotních oblastech hrozí nebezpečí koroze korozivními látkami. Opatřením pro tento případ je snížení teploty a užití kvalitního materiálu. Má poměrně dlouhou dobu náběhu. Pro vyšší výkony jsou zapotřebí vysoké náklady. ^[13]

Základními výhodami jsou jednoduchá konstrukce a obsluha během provozu. Plyn má nízký obsah prachu a je možné ho přímo spalovat. Tyto reaktory jsou hojně rozšířené v technické praxi a mají široké uplatnění. ^{[11][21]}

3.2 Zplyňovací reaktor s fluidním ložem

Původně byly reaktory s fluidním ložem navrženy pro zplyňování uhlí a až později se začala používat biomasa. Pracují na principu zplyňování biomasy ve vzhledu. Palivo leží na porézním dně společně s inertním materiálem (písek, keramika, popel), který je zpravidla nahříván spalováním uhlí. Pro překonání tíhové síly působící na materiál je zespodu přiváděno zplyňovací médium, díky čemuž palivo s inertním materiálem začne vířit. Narozdíl od reaktoru s pevným ložem zde probíhají všechny zplyňovací procesy současně a nabízejí vyšší výkon. Teplota fluidní vrstvy bývá přibližně 700-900 °C a asi 25 % biomasy se ve fluidní vrstvě spálí. Rozlišujeme generátory se stacionární fluidní vrstvou a s cirkulující fluidní vrstvou. ^{[11][13][21]}



Obrázek 6 Schéma fluidního reaktoru ^[21]

Mezi výhody tohoto typu reaktoru patří rovnoměrné rozložení teplotního profilu, možnost využití více druhů paliva, relativně nízká provozní teplota a kompaktní konstrukce. Má dobrý kontakt mezi plynem a palivem, dobrou distribuci tepla, snadný náběh a zastavení. Řeší některé problémy spojené s reaktorem s pevným ložem jako je ucpávání, zplyňování malých částic s vysokým obsahem popela, klenbováním paliva a tvorbou kanálů a nerovnoměrné rozložení teplot v procesních pásmech. ^{[11][21]}

Naopak nevýhodou je vysoký obsah dehtu a prachu ve vyrobeném plynu, vysoká teplota vyrobeného plynu s obsahem alkalických kovů ve formě páry, nevyhořelý uhlík. Dále je složitější provoz kvůli kontrole přívodu paliva a média, a navíc větší spotřeba energie pro kompresi plynu. Je nutná vysoká rychlost fluidizujícího média. ^{[11][21]}

Charakteristické pro **reaktor se stacionární fluidní vrstvou** je viditelné rozhraní mezi ní a prostorem nad vrstvou, protože fluidní vrstva má viditelnou hladinu. Obsah dehtu v plynu je přibližně 1-2 %. ^[21]

Reaktor s cirkulující fluidní vrstvou na rozdíl od předchozího typu nemá viditelnou hladinu vrstvy. Fluidní vrstva se vyznačuje rozdílnou hustotou, kde nahoře je nejnižší a u dna nejvyšší. V cyklonu jsou oddělovány unášené částice, které cirkulují zpět do spodní části vrstvy. Vzhledem k cirkulující vrstvě je využití paliva a množství zreagovaného uhlíku vyšší než u stacionární vrstvy. ^[21]

Oba typy reaktorů s fluidním ložem mají široké využití a produkují kvalitní bioplyn. A naopak mají vyšší nároky na úpravu paliva a zanedbatelnou tvorbu dehtů. ^[11]

3.3 Reaktor s unášivým proudem

Reaktor s unášivým proudem funguje na principu zplyňování jemně rozemletého paliva, které je vháněno velkou rychlostí společně se zplyňovacím médiem do reaktoru. Palivo může být přiváděno v mokré formě (uhelný kal v kašovité formě) nebo v suché (ve směsi s dusíkem). Zplyňování probíhá při vysokých teplotách 1200-2000 °C ^[21], při kterých se popel roztaví na strusku a odtéká ze zplyňovacího zařízení. Tlak bývá přibližně 35 bar ^[11]. Vyrobený plyn má nízký obsah dehtu a je kvalitní. Nevýhodou je omezení velikosti částic paliva a velké množství nosného média. ^{[11][13][21]}

4 Vyroběný plyn

Výsledkem zplyňovacího procesu organické hmoty, tedy biomasy, je výhřevný energetický plyn. Obsahuje výhřevné složky (H_2 , CO , CH_4 a další minoritní sloučeniny), doprovodné složky (CO_2 , H_2O , N_2) a znečišťující složky (dehet, prach, sloučeniny síry, chloru, alkálie a další).^{[11][23]}

Při fluidizaci vzduchem má plyn naředěný dusíkem poměrně malou výhřevnost, přibližně $4\text{--}7\text{ MJ/m}^3$. Ovšem při zplyňování směsí vzduchu a kyslíku, případně i vodní páry, má vygenerovaný plyn větší výhřevnost, asi $10\text{--}15\text{ MJ/m}_n^3$.^[11]

Uplatňuje se především jako energetický plyn a syntézní plyn. Vyprodukovaný plyn při zplyňování je použitelný bez větších úprav pro spalování v kotlových hořácích a po dodatečném vyčištění i ve spalovacích komorách turbín a upravených spalovacích motorech.^{[8][11]}

Kvalitu a složení generátorového plynu ovlivňují tyto parametry:^[11]

- a) Zplyňovací médium - vzduch, kyslík, vodní pára
- b) Tlak a teplota zplyňování
- c) složení biomasy
- d) příprava biomasy a velikost jednotlivých částic
- e) rychlost ohřevu použitého zplyňovacího reaktoru
- f) doba setrvání suroviny v reaktoru
- g) konfigurace provozu jako – systém zásobování, geometrie systému proudění suroviny a reagující látky, systém odstranění minerálů (suchý popel, struska), generování tepla a způsob přenosu tepla (přímý, nepřímý), výstupní systém čištění vzniklého plynu (nízké nebo vysoké teploty)

4.1 Nečistoty v plynu

Vygenerovaný plyn ze zplyňovacího zařízení obsahuje nečistoty, které lze rozlišovat na:

- a) Pevné částice
- b) Alkalické sloučeniny
- c) Dehty
- d) Dusíkové sloučeniny
- e) Síru
- f) Chlór^[13]

Uhlovodíky jsou v syntetickém plynu neprospěšné, protože jsou nereaktivní a snižují celkovou účinnost přeměny. Navíc mohou deaktivovat katalyzátory v systému.^[13]

Množství pevných částic obsažených ve vystupujícím plynu ze zplyňovacího procesu je ovlivněno obsahem minerálních látek v biomase, nezreagovanou částí paliva nebo materiálem z lože reaktoru. Nejméně minerálních látek obsahuje dřevo (1-2 %), větší množství obsahují bylinné rostliny (až 10 %) a slámy (15-20 %). Fluidní reaktory podporují turbulentní podmínky, díky kterým dochází k vysokému znečištění plynu částicemi. Opatřením jsou cyklony sloužící pro odstranění těchto částic. Ovšem nezachytí popílek obsahující částičky malé velikosti. Tvorba pevných částic je nežádoucí, protože mohou obrušovat a poškozovat zařízení.^[13]

4.1.1 Pevné částice

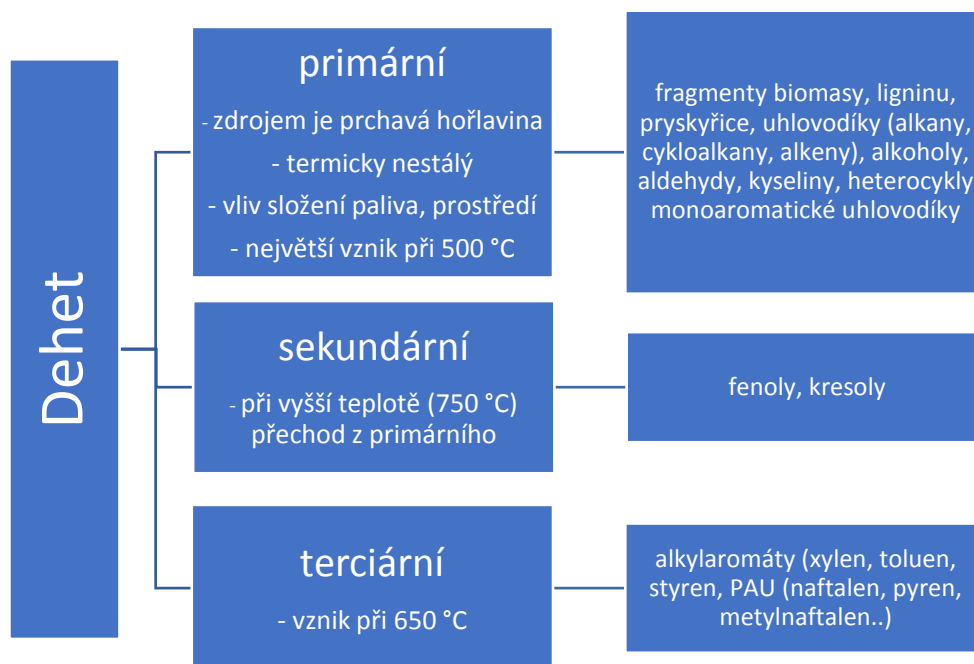
Pevné znečišťující látky vystupující z reaktoru jsou tvořeny především anorganickými zbytky paliva (popelovinami) a nezreagovanou biomasou ve formě zuhelnatělého materiálu (tzv. polokoksu). Určitý podíl částic tvoří také saze a nespálený uhlík. Popřípadě inertní materiál jako je kamení či písek z lože zplynovače. Zdrojem pevných částic v plynu mohou být i nečistoty v samotném palivu, které se do něj mohli dostat při manipulaci nebo skladování paliva. Jedná se například o zeminu či kamení, které při zplyňování a zmenšení objemu částic paliva odlétávají, a tím energoplyn znečišťují. Plyn s vysokým obsahem pevných částic je typický pro generátory s fluidním ložem a turbulentními podmínkami uvnitř reaktoru. Pevné částice spolu s dehtem tvoří nánosy a působí abrazivně uvnitř zařízení. ^{[2][7][9][14][19]}

4.1.2 Alkalické sloučeniny

Alkalické složky popela mohou být příčinou řady provozních problémů. Zejména sodné a draselné eutektické soli v popelu se vypařují při teplotě 700 °C ^[19], a následně na chladnějších částech zařízení tvoří sklovité nánosy. Poškozují tak zařízení za generátorem jako jsou nejčastěji výměníky, lopatky turbín a spalovací motory. Tyto soli způsobují korozi kovových konstrukčních materiálů, mohou také deaktivovat některé katalyzátory používané pro separaci dehtu. Čištění je nejčastěji řešeno ochlazením plynu a odloučením jemných částic, na nichž soli při teplotách pod 600 °C ^[19] kondenzují. Odloučení je realizováno pomocí elektrostatických filtrů nebo mokřých praček. Bohužel toto čištění nese velkou ztrátu tepla a snížení účinnosti zařízení. ^{[2][7][9][14][19]}

4.1.3 Dehty

Dehet je vedlejší produkt pyrolýzních reakcí, kdy hlavním zdrojem je prchavá hořlavina. Jedná se jednoznačně o nechtěnou složku v plynu. Dehet je rozdělen do třech základních skupin podle podobných fyzikálních a chemických vlastností (primární, sekundární, terciární). ^{[2][7][9][14][19]}



Obrázek 7 Rozdělení dehtu ^[19]

Dehet se v plynu vyskytuje ve formě par nebo aerosolu. Je-li jeho hodnota příliš vysoká, je nutné jej z plynu odstranit. Kondenzuje na chladnějších površích, čímž působí velké problémy například pro spalovací motory, tvoří by usazeniny a nánosy v potrubí a na ventilech. Pro plynové turbíny z důvodu vyšších teplot ve spalovací komoře není až takovou hrozbou. Obsah dehtu v plynu ze zplyňování biomasy kolísá od 1 do 15 g/m³ [2] (extrémně až k 75 g/m³) [2] v závislosti na charakteristice paliva, typu zplyňovače, délce setrvání v reaktoru a teplotě v loži při zplyňování. Ne všechny látky obsažené v dehtu jsou škodlivé pro další použití plynu. Některé mohou kladně ovlivnit výhřevnost plynu. [2][7][9][14][19]

Mezi dominantní látky dehtu patří zejména: antracen, inden, toluen, naftalen, fenantren. Obsahuje také vyšší uhlovodíky, jako jsou například aromáty (naftalen, acetaftalen, antracen). Dále dusíkaté látky (pyridin, chinolin, indol, karbazol, anilin), kyslíkaté sloučeniny (dibenzofuran, fenol, kumaron, xanten) a sírné sloučeniny (thiofenol, thionaftalen, thiofen, thioxanten). Další látky obsažené v dehtu patří volný uhlík, neutrální pryskyřice a vysokovroucí uhlovodíky. [2][7][9][14][19]

4.1.4 Dusíkaté sloučeniny

Hlavní látkou obsahující dusík v surovém plynu je amoniak neboli čpavek NH₃. Amoniak vzniká převážně konverzí bílkoviny a dalších složek biomasy obsahujících dusík. Jeho množství závisí převážně na redukčním prostředí a druhu zplyňovacího média. Zplyněním surovin s vyšším obsahem proteinů, například živočišné odpady, vzniká více amoniaku. Přítomnost amoniaku v energoplynu je nežádoucí převážně kvůli následné tvorbě emisí NO_x při spalování, které jsou omezeny emisními limity. [2][7][9][14][19]

Odstranění sloučenin dusíku se provádí použitím katalyzátorů pro redukci NO_x, nebo ještě před spalováním použitím katalyzátoru na rozklad NH₃. Není vhodné použít mokrou vypírku pro odloučení dusíkatých sloučenin kvůli jejich vysoké rozpustnosti ve vodě. Po nasycení vody není voda již schopna NH₃ absorbovat. Přesto je tuto metodu při nízkých teplotách plynu možné aplikovat. [2][7][9][14][19]

4.1.5 Síra

Síra zastoupená v palivu se při zplyňování přemění na sirovodík H₂S (93–96 %) [2], menší část pak na sirouhlík CS₂, zatímco sloučeniny COS a SO_x se vyskytnou v minimálním množství. Obsah síry se v dřevní hmotě nachází pod hranicí 0,1 %hm. Takové hodnoty jsou i pod hranicí měřitelnosti. Síra spolu s chlorem, fluorem a alkalickými solemi působí na materiál ocelových konstrukcí a kovové katalyzátory k odstraňování dehtů korozivně. Také působí problémy při používání některých katalytických filtrů, kde způsobuje tzv. otravu sírou. Proto je i přes její malé množství důležité dokonalé odstranění veškeré síry z plynu. Pro odstranění síry jsou sice velmi nákladné ale v praxi dobře odzkoušené mokré vypírky s aditivy. [2][7][9][14][19]

4.1.6 Chlór

V biomase je chlór zastoupen v poměrně malém množství. Může být příčinou vzniku koroze na kovových konstrukcích a může omezit reaktivitu některých katalyzátorů. Jeho nejčastější formou je HCl, který vzniká reakcí chlóru s vodíkem. Mimo reakci s vodíkem reaguje s celou řadou jiných prvků jako i s uhlíkem, kde je chlór příčinou tvorby perzistentních organických látek (PCDD – polychlor-dibenzo-dioxin, PCDF -

pentachlor-dibenzofuran). Tyto dioxiny a furany mají ve vyšších koncentracích negativní dopad na lidské zdraví. Některé tyto sloučeniny chlóru je možné odstranit mokrou vypírkou, bariérovými filtry nebo katalyzátory na bázi vápence. ^{[2][7][9][14][19]}

4.2 Čištění plynu

Vyrobený plyn zplyňováním vždy obsahuje znečišťující látky, jako jsou pevné částice, dehet, sloučeniny dusíku, síry a jiné. Tyto látky je potřeba z plynu odstranit čištěním. Kvalita a obsah plynu závisí na složení biomasy, na procesu zplyňování a na zplyňovacím mediu. Tyto škodliviny jsou obvykle neslučitelné s dalším využitím plynu a podléhají emisním předpisům. Způsobují abrazi, nánosy na povrchu zařízení, koroze atd. Rozlišujeme dvě základní metody čištění plynu, a sice primární opatření a sekundární opatření. Navzájem se doplňují. ^{[13][23]}

Primární opatření se týká samotného procesu zplyňování. Mluvíme o volbě vhodného zplyňovacího média, vhodné teplotě zplyňování a tlaku zplyňování. U fluidních reaktorů lze použít katalyzátory ke zkvalitnění plynu. ^{[8][23]}

Sekundární opatření používá návazné technologie na primární. Jedná se o cyklóny, filtry, mokré vypírky, katalytické reaktory. Obecně je možné rozlišit dva přístupy u sekundárního opatření – nízkoteplotní a vysokoteplotní. U nízkoteplotního čištění je plyn ochlazován pod bod varu kapaliny, se kterou přichází do kontaktu (olej, voda). Pro energetické zpracování musí být plyn znovu zahříván, kvůli čemuž dochází ke ztrátám energie. Z toho důvodu lze použít vysokoteplotní čištění. Nečistoty jsou tak za vysokých teplot odstraněny pomocí sorpčních a katalytických metod. ^{[13][22][23]}

Požadavky na metody čištění plynu zahrnují: ^[2]

- Nízkou energetickou náročnost
 - o Malá tlaková ztráta
 - o Nízký či žádný požadavek na přehřívání plynu nebo zařízení
 - o Co nejvyšší využití fyzického tepla generovaného plynu
- Vysokou účinnost odstranění polutantů
- Minimální odpad

4.2.1 Čištění částic

Pro odstranění částic z plynu se využívají tyto základní technologie: ^[13]

- Cyklónové filtry
- Bariérové filtry
- Elektrostatické filtry
- Mokrý pračky

Cyklónové filtry pracují na principu cirkulace proudu plynu, a díky setrvačným silám jsou částice odděleny. S tímto typem filtru lze odstranit více než 90 % částic velikostí nad 5 μm . Obvykle se používá více cyklónových filtrů k čištění, které jsou zapojeny do série. První zachycuje největší částice a ty následující zbylé jemnější částice. Mohou pracovat za vysoké provozní teploty. ^[13]

Bariérové filtry zahrnují porézní materiály jako je keramika nebo kov. Kovové filtry mohou vyžadovat chlazení. Účinně odstraňují malé částice v rozmezí o velikosti 0,5-100 pm. Jedná se především o suché částice. Pro vlhké částice nejsou tak vhodné. Dobře fungují při středních až vysokých teplotách. ^[13]

V případě **elektrostatických filtrů** je plyn nucen procházet vysokonapětovými elektrodami. Částicím je tak dodáván elektrický náboj, díky kterému se shromažďují a usazují na povrchu desky. V případě suchého odstranění částic ze sběrné desky stačí mechanická síla. U mokré metody se využívá proud vody. ^[13]

Mokré pračky fungují na základě shromažďování částic pomocí kapiček kapaliny, díky kterým dojde k jejich spojení a následnému odstranění. Při této metodě čištění plynu je využívána voda při teplotě pod 100 °C. ^[13]

4.2.2 Čištění dehtů

Pro odstranění dehtů se využívají dvě metody: ^[13]

- 1) Fyzikální odstranění dehtu - filtry
- 2) Katalytická (800 °C) a tepelná destrukce (1200 °C)

Podobně jako u pevných částic lze použít mokré pračky. Dehty jsou hydrofobní a špatně se rozpouští, a proto se separují pomocí rozpouštědel. Až z 99 % lze dehet odstranit pomocí mokrých elektrostatických odlučovačů. Bariérové filtry jsou pro dehty nevhodné, protože se z nich špatně čistí a může docházet k jeho ucpání. Cyklony jsou pro dehet nevhodné kvůli jeho lepkavosti. ^[13]

Existují kovové a nekovové katalyzátory pro eliminaci dehtu. Mezi nekovové řadíme levné materiály, jako jsou dolomity, zeolity a kalcity. Kovové katalyzátory odstraňují dehet a ničí amoniak. Problém může způsobit H₂S. Termální destrukce může probíhat bez přítomnosti katalyzátorů. Tato metoda vyžaduje vyšší teplotu (900-1300 °C). Při tak vysokých teplotách ovšem dochází k tvorbě sazí a zvyšují se tepelné ztráty. ^[13]

4.2.3 Čištění ostatních nečistot

Další škodliviny, které jsou potřeba z plynu odstranit, jsou sloučeniny dusíku. Jedná se hlavně o amoniak, který se při spalování mění v oxidy dusíku NO_x. Lze je eliminovat pomocí katalytické destrukce nebo mokrou pračkou. ^[13]

Katalytická destrukce amoniaku probíhá stejně jako u dehtů. Za teploty 900 °C by měly katalyzátory na bázi železa odstranit téměř všechno amoniak. Mokrá pračka je velmi účinnou metodou čištění amoniaku, při které je plyn chlazený. ^[13]

Pro odstranění alkalických sloučenin se rovněž používají filtry. Plyn je ochlazován pod teplotu 600 °C a dochází ke kondenzaci alkalických solí na malé částice. Ovšem pracovní teplota musí být nízká. ^[13]

Další nečistoty, které mohou znehodnocovat plyn a způsobovat problémy jsou nejjednodušejí a efektivně odstraňovány pračkami. ^[13]

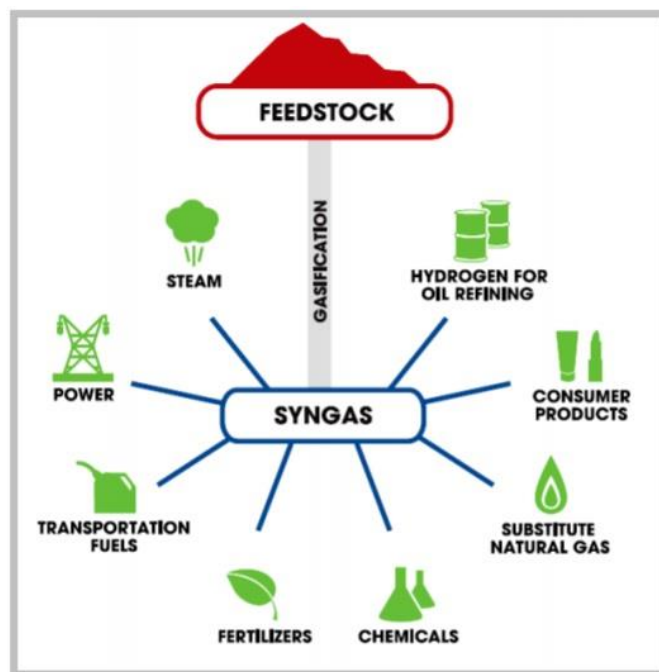
4.3 Využití plynu

Hlavními složky vyrobeného plynu při zplyňování jsou oxid uhelnatý CO a vodík H₂. Tyto složky jsou základními prvky pro výrobu dalších produktů. Zplyňovací provoz může být navržen jako koprodukce, tzn. produkování více produktů najednou. Flexibilita procesu umožňuje zvýšit účinnost zařízení a zlepšit ekonomiku provozu. ^[11]

Konečné využití plynu určuje požadavky na kvalitu plynu. Lze rozlišit typy systémů pro úpravu plynu: ^[13]

- a) Systémy s minimálním zpracováním plynu
- b) Systémy vyžadující značné čištění plynu při teplotě pod 100 °C pro náročné aplikace jako motory.
- c) Systémy vyžadující značné čištění plynu při teplotě nad 100 °C pro náročné aplikace jako plynové turbíny
- d) Systémy vyžadující speciálně čistý plyn pro výrobu syntézních plynů

Vyprodukovaný plyn lze využít k výrobě dalších produktů: ^[11]



Obrázek 8 Možnosti využití plynu ze zplyňování ^[11]

- 1) Pára, 2) Energie (kombinovaná výroba tepla a elektrické energie), 3) Dopravní paliva, 4) Hnojiva, 5) Chemikálie, 6) Náhradní přírodní palivo, 7) Konzumní produkty, 8) Vodík pro rafinaci ropy

4.3.1 Pára

Parní cyklus patří mezi nejrozšířenější řešení při kombinované výrobě elektřiny a tepla. Jako zdroje páry pro turbíny se využívá nejčastěji parních kotlů na biomasu, nebo biomasu kombinovanou s fosilním palivem. Zdrojem páry v dalších variantách může být právě třeba plynový kotel, ve kterém se spaluje produktový plyn ze zplyňování. ^[11]

4.3.2 Výroba elektrické energie a tepla

Pro výrobu elektrické energie a tepla lze využít produkty z nízkoteplotního i vysokoteplotního zplyňování. Ovšem vhodnější je plyn vyrobený nízkoteplotním zplyňováním, jelikož má vyšší energetickou účinnost a nižší výrobní náklady. ^{[2][19]}

Podle kvality a čistoty plynu volíme způsob využití. Obsah dehtu a prachových částic v plynu je nejméně důležitým pro procesy přímého spalování jako například spalování v hořácích. Při dodržení vysokých teplot plamene dochází prakticky k úplnému spálení dehtu. Pro rozvod plynu však musí být zvoleno co nejkratší potrubí a teplota plynu v potrubí by neměla klesnout pod 300–350 °C ^[19]. Dehet v plynu by mohl kondenzovat a společně s tuhými částicemi potrubí ucpat. ^{[2][19]}

Pro plynové turbíny díky vyšším teplotám dehet takovým problémem není, tuhé znečišťující látky však působí erozi lopatek. Alkalické kovy a sloučeniny síry a chlóru vytváří nánosy na studenějších površích a způsobují vysokoteplotní korozi. ^{[2][19]}

Nejrozšířenějším způsobem získání energie z plynu je spalovací motor, je také zároveň i nejchoulostivější na dehet a pevné částice v plynu. Dehet se při změnách teplot usazuje, tvoří stabilní aerosoly, ty se pak s nízkými teplotami a nedokonalým spalováním transformují na saze. Pevné částice i se sazami způsobují abrazi a nadměrné opotřebení pohybových částí motoru. ^{[2][19]}

4.3.3 Dopravní paliva

Na proces zplyňování biomasy může navazovat i výroba kapalných biopaliv. A to procesem ve světě známým pod pojmem Fischer-Tropsch, který využívá plynné produkty zplyňování biomasy – oxid uhelnatý a vodík. Jedná se o katalytický proces, při němž probíhá syntéza oxidu uhelnatého a vodíku na vyšší kapalné uhlovodíky. ^[15]

Provozní podmínky pro tyto procesy jsou 200-300 °C a 25-60 bar. Při vysoké teplotě (330-350 °C) vzniká benzín a lehké olefiny a při nízkých teplotách (220-250 °C) vzniká nafta. Při této FT syntéze se používají katalyzátory s železem nebo kobaltem. Kobaltové katalyzátory mají větší životnost, jsou více reaktivní. Železné katalyzátory jsou levnější a mají větší toleranci na síru. ^[13]

4.3.4 Hnojiva

Syntéza amoniaku NH_3 je základem výroby průmyslových dusíkatých hnojiv. Přítomnost amoniaku v energoplynu je nežádoucí hlavně kvůli tvorbě emisí NO_x při spalování. Je tedy velmi výhodné v plynu nechtěný čpavek využít k syntéze pro výrobu hnojiv. Odhaduje se, že rostliny pěstované s využitím umělých dusíkatých hnojiv zajišťují výživu téměř polovině světového obyvatelstva. ^[5]

5 Zplyňovací médium

Mezi zplyňovací média se řadí vzduch, čistý kyslík O₂, pára, oxid uhličitý CO₂ a jejich směsi. ^[8]

Tabulka 3 Procentuální podíl složek plynu po zplyňování médiem ^[8]

Parametr	Zplyňování vzduchem (autotermní)	Zplyňování parou (alotermní)	Zplyňování paro-kyslíkovou směsí (autotermní)
Výhřevnost, MJ m _N ⁻³	4–6	12–14	12–15
H ₂ , %	11–16	35–40	25–30
CO, %	13–18	25–30	30–35
CO ₂ , %	12–16	20–25	23–28
CH ₄ , %	3–6	9–11	8–10
N ₂ , %	45–60	<1	<1

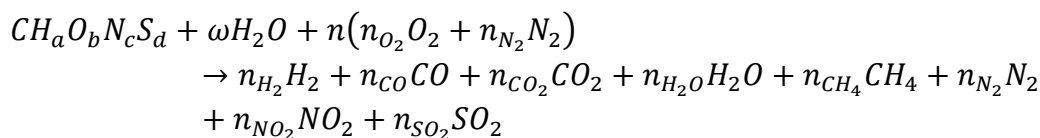
5.1.1 Vzduch

Vzduch je často používané zplyňovací činidlo pro tvorbu plynu z biomasy. Důvodem je především jeho dostupnost, jednoduchost, provozní a ekonomické výhody. Je složen především z dusíku (79 %) ^[18], což je příčinou nízké výhřevnosti výsledného plynu, která se pohybuje v rozmezí 3–6 MJ/m_n³ ^[18]. Energoplyn má tak nízký obsah vodíku a velký obsah dusíku. ^{[1][18]}

Takto vyrobený plyn je vhodný pro kotle a motory. Bohužel se nehodí pro aplikace, které vyžadují dopravu potrubím. Pro lepší vlastnosti vygenerovaného plynu se využívají pro zplyňování biomasy jiná činidla či jejich směsi. ^{[1][18]}

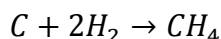
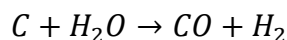
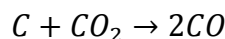
5.1.2 Kyslík

Kromě vzduchu lze zplyňovat i čistým kyslíkem nebo jejich směsí. Tento proces tvorby plynu z biomasy popisuje rovnice: ^[10]



kde $CH_aO_bN_cS_d$ je biomasa, ωH_2O je obsah vlhkosti v biomase a n jsou kilomoly zplyňovacího média na kilomoly vstupující biomasy. Na základě typu a vlastností biomasy a zplyňovacího činidla jsou určeny hmotnostní bilance pro H, C, O, N, S. ^[10]

Reakce při zplyňování, ke kterým dochází lze popsat chemickými rovnicemi: ^[10]



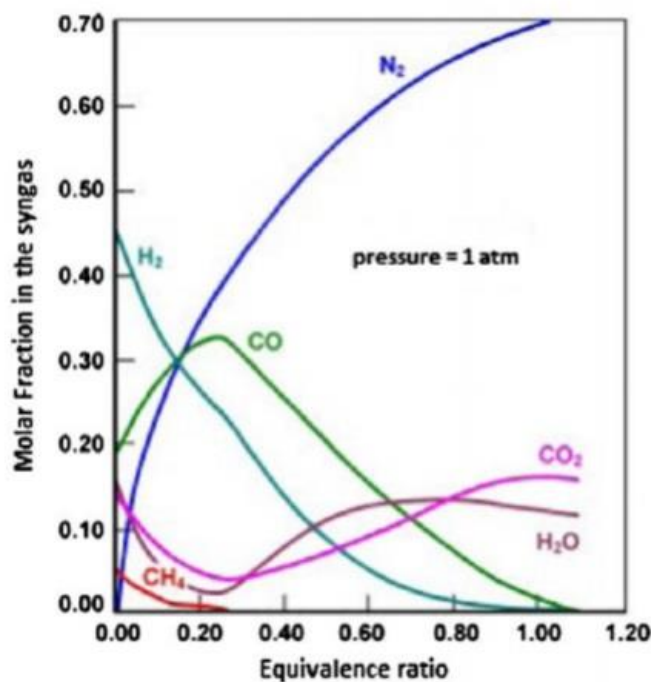
Při zplyňování kyslíkem se sleduje hmotnostní poměr mezi ním a biomasou. Tento poměr se zpravidla pohybuje v rozmezí od 0 do 0,5. Se zvýšením poměru kyslíku vůči biomase se zvyšuje produkce oxidu uhličitého CO₂ a klesá obsah molekuly vodíku H₂ a metanu CH₄. Naopak při malém množství kyslíku roste množství CO. Celkově se právě díky kyslíku sice zvýší výhřevnost výsledného plynu, ale vzrostou tak provozní

náklady z ekonomického hlediska. Při částečném spalování biomasy je poskytnuto teplo potřebné pro zplyňování. ^[10]

Dalším parametrem při zplyňování kyslíkem je zplyňovací poměr ER. Jedná se o poměr obsahu kyslíku ve zplyňovacím médiu ku množství kyslíku potřebného k dokončení stechiometrického spalování. Tento poměr ovlivňuje složení plynu i obsah dehtu. Zvýšením tohoto parametru roste teplota v reaktoru. ^[18]

$$ER = \frac{\text{množství kyslíku v médiu}}{\text{stechiometrické množství kyslíku v médiu}} \quad (5.1)$$

Jestliže se poměr ER blíží nule, je proces blízký pyrolýze. Ovšem pokud se zplyňovací poměr rovná nebo je větší než 1, jedná se spíše o spalování. Optimální hodnota ER pro zplyňování biomasy je 0,2 – 0,3. Závisí na typu biomasy a jejího složení (obsah kyslíku a popela). Má vliv na složení vyrobeného plynu a na obsah dehtu, který klesá se zvyšujícím se ER. ^[18]

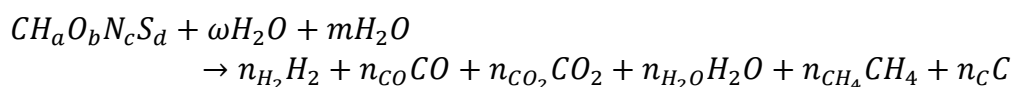


Obrázek 9 Závislost složení plynu na poměru ER ^[18]

Kyslík jako zplyňovací činidlo zlepšuje kvalitu plynu. Výhřevnost energoplynu tak dosahuje 12 MJ/m_n³. Výhodou je možnost přepravy plynu v potrubních sítích. ^[18]

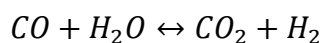
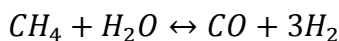
5.1.3 Pára

Zplyňování biomasy pomocí vodní páry lze popsat rovnicí: ^[10]



kde $CH_aO_bN_cS_d$ je biomasa, ωH_2O je obsah vlhkosti v biomase a m jsou kilomoly zplyňovacího média na kilomoly vstupující biomasy (molární poměr páry k biomase). ^[10]

Hlavní reakce při tomto typu zplyňování popisují tyto chemické reakce: ^[10]



Experimentální data z odborné literatury pro směs vzduchu, kyslíku a vodní páry jako zplyňovacího činidla jsou zobrazeny v tabulce. ^[11]

Tabulka 4 Experimentální podmínky z odborné literatury ^[1]

Měření	1	2	3	4	5
Průtok biomasy [kg/h]	12,4	10	16,2	12	14
Průtok vzduchu [m_n^3/h]	11,9	9,1	10,6	7,7	11,6
Průtok kyslíku [m_n^3/h]	1,5	1,2	1,4	1	2,3
Průtok páry [kg/h]	3,7	5,6	4,7	6,5	4,3
Střední teplota lože [°C]	808	790	781	765	820

Při zplyňování parou se sleduje molární objem páry a uhlíku obsaženého v biomase. Hodnoty tohoto parametru se pohybují v rozmezí od 0 do 2 ^[6]. Se zvyšujícím se obsahem páry se i zvyšuje produkce H_2 a CO_2 , naopak CH_4 a CO klesají. Zároveň se snižuje obsah dehtu poměrem páry k biomase. Díky páře, jako zplyňovacího činidla, se výhřevnost vygenerovaného plynu zvýší. Většinou se pohybuje až k $14 MJ/m_n^3$ ^[11]. Ovšem příliš mnoho páry může snížit teplotu procesu, a tak negativně ovlivnit kvalitu plynu. ^{[6][18]}

V případě čisté páry je vyžadovaný nepřímý nebo externí přívod tepla pro endotermní zplyňovací reakce. Používá se i směs vzduchu s vodní párou. Snížením obsahu dusíku v plynu se zvýší výhřevnost a zároveň výtěžek plynu. ^{[6][18]}

Poměr páry ku biomase se vypočítá podílem hmotnostního toku vody v palivu a vodní páry vháněné do reaktoru jako zplyňovací činidlo ku hmotnostnímu toku paliva (biomasy). Jak ovlivňuje tento parametr složení plynu je znázorněno v tabulce z experimentálního měření z roku 2014 na zplyňovacím zařízení Biofluid 100. ^[18]

$$\frac{P}{B} = \frac{\text{pára}}{\text{biomasa}} = \frac{\dot{m}_{H_2O,pal} + \dot{m}_{H_2O}}{\dot{m}_{pal}} \quad (5.2)$$

Kde: $\frac{P}{B}$ – poměr páry a biomasy [-]

$\dot{m}_{H_2O,pal}$ – hmotnostní tok vody obsažené v palivu [kg/h]

\dot{m}_{H_2O} – hmotnostní tok vodní páry vháněné do reaktoru [kg/h]

\dot{m}_{pal} – hmotnostní tok paliva (biomasy) [kg/h]

Tabulka 5 Složky plynu v závislosti na poměru P/B ^[18]

T101 = 829 (°C), Tfl = 260 (°C), ER=0.29									
$\frac{S}{B}$	H ₂	CO	CH ₄	CO ₂	C ₂ H ₆	O ₂	N ₂	Others	total
0	10.48	16.60	1.98	14.11	0.09	0.054	56.41	0.25	100
0.23	14.16	16.61	2.50	14.24	0.17	0.071	51.75	0.46	100
0.4	16.33	16.33	2.99	14.60	0.20	0.083	49.15	0.30	100
0.50	17.46	15.99	3.22	14.80	0.23	0.059	46.65	1.57	100
0.6	18.97	15.77	3.45	15.36	0.25	0.005	46.00	0.16	100
0.67	19.67	15.46	3.49	15.59	0.30	0.05	44.60	0.80	100
0.7	19.54	15.09	3.55	15.89	0.29	0.004	45.28	0.33	100
0.75	18.29	14.81	3.56	16.02	0.25	0.045	46.80	0.21	100
0.85	17.89	14.51	3.58	16.10	0.23	0.045	47.35	0.27	100

6 Návrh experimentu

Části této práce byl návrh experimentů zplyňování dřevní biomasy s přidavkem vodní páry a kyslíku a jejich následné provedení. Výsledkem byla analýza složení plynu a obsahu dehtu. Cílem bylo vyhodnocení výsledků a jejich porovnání.

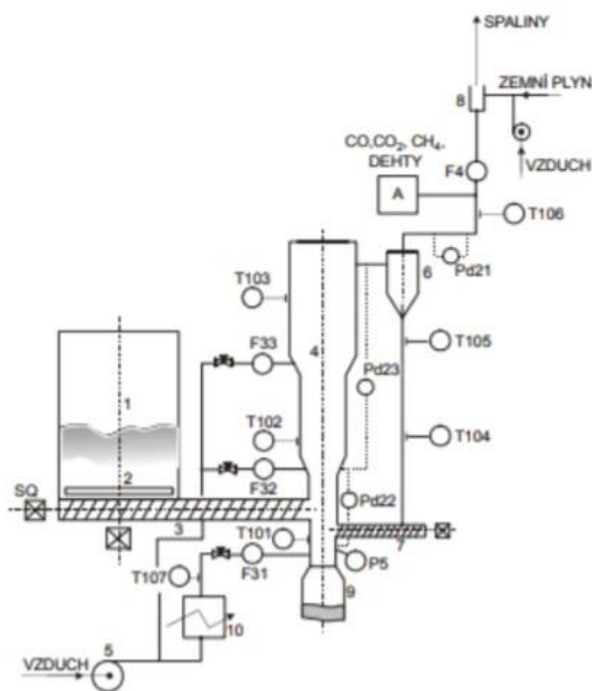
6.1 Popis zařízení

Experiment byl proveden na Energetickém ústavu FSI VUT v Brně. Jedná se o atmosferický zplyňovací reaktor se stacionární fluidní vrstvou Biofluid 100. Toto zplyňovací zařízení bylo uvedeno do provozu v roce 2000. Znamé parametry tohoto reaktoru jsou:

a) Výkon (v produkovaném plynu)	100kWt
b) Příkon (v palivu)	150kWt
c) Spotřeba paliva	max. 40 kg/h
d) Průtok vzduchu	max. 50m ³ /h ^[7]



Obrázek 10 Biofluid 100



Obrázek 11 Schéma Biofluid 100^[7]

Na schématu zplyňovacího zařízení Biofluid 100 lze vysvětlit jeho princip. Do zásobníku (1) je nasypáno palivo. Hrablo (2) slouží pro rozduřování klenby paliva. Palivo je dále dopravováno šnekovým podavačem (3), který je regulovaný frekvencí, a tak dřevní štěpku vhání do reaktoru (4). Přívod spalovacího vzduchu pomocí dmyhadla (5) je rozdělen na primární (F31) vháněný do reaktoru pod rošt, na sekundární (F32) a terciární (F33). Energoplyn je zbaven úletu v cyklonu (6), a poté spálen v hořáku (8). Popel vzniklý při procesu zplyňování spadá do záchytné nádoby (9). Za dmyhadlem se nachází elektroohřívač vzduchu (10).

Pro provedení experimentu bylo potřeba najetí zplyňovacího zařízení do ustáleného stavu pomocí spalovacího režimu. Je to stav, kdy již není potřeba měnit množství dávkovaného paliva, množství zplyňovacího činidla a teplota ve střední části je stabilní.

6.2 Palivo

Palivem bude dřevní štěpka ze smrkového dřeva. Před manuálním vsypání paliva do zásobníku paliva je potřeba jej nadrtit. Poklop zásobníku musí být řádně uzavřený. Pro dobrý průběh experimentu musí být v zásobníku dostatek paliva. Jeho množství přiváděného do reaktoru je regulováno nastavením frekvence dopravníku. Pozornost se musí věnovat i nebezpečí zahlcení šnekového dopravníku palivem.

Množství paliva bude určeno pomocí podávací zkoušky. Tímto bude stanovena závislost dopravovaného paliva do reaktoru na otáčkách šnekového dopravníku. V určitém časovém intervalu při dané frekvenci je měřený hmotnostní tok paliva. Aritmetickým průměrem naměřených hodnot je stanovena skutečná hodnota množství paliva.

Pro vyvození závěru z experimentu je nutný rozbor biomasy:

- 1) Hrubý rozbor paliva – především vlhkost
- 2) Prvkový rozbor
- 3) Energetický obsah (výhřevnost a spalné teplo)

Byl odebrán vzorek paliva na analýzu do experimentální laboratoře na VUT. Vlhkost paliva byla zjištěna pomocí sušící pece a vážícího zařízení. Hodnoty jsou stanoveny hmotností před vysušením a po vysušení.

V laboratoři bylo rovněž změřeno spalné teplo dřevní štěpky. To lze stanovit v kalorimetru. Ze stanoveného spalného tepla lze vypočítat výhřevnost paliva.

Prvkový rozbor smrkové dřevní štěpky lze zjistit z databáze pro energetické parametry biomasy.

6.3 Zplyňovací médium

Zplyňovacím médiem dle tématu diplomové práce je vzduch s přidavkem kyslíku a vodní páry. Vzduch, který je obecně tvořený asi ze 79 % dusíkem a 21 % kyslíku, bude obohacený kyslíkem o 4 %. Z toho vyplývá procentuální poměr 75 % dusíku a 25 % kyslíku. Množství vodní páry bylo regulováno přes počítač.

Nejprve proběhly tři měření za teploty 500 °C při hmotnostním průtoku páry 12, 8 a 4 kg/h. Poté byla změněna teplota na 600 °C při hmotnostním průtoku páry 8 kg/h a nakonec 0 kg/h vodní páry při teplotě 400 °C. Proběhlo tedy celkem pět režimů měření:

- 1) $m_{\text{H}_2\text{O}}=12 \text{ kg/h}$, $T=500 \text{ °C}$
- 2) $m_{\text{H}_2\text{O}}=8 \text{ kg/h}$, $T=500 \text{ °C}$
- 3) $m_{\text{H}_2\text{O}}=4 \text{ kg/h}$, $T=500 \text{ °C}$
- 4) $m_{\text{H}_2\text{O}}=8 \text{ kg/h}$, $T=600 \text{ °C}$
- 5) $m_{\text{H}_2\text{O}}=0 \text{ kg/h}$, $T=400 \text{ °C}$

6.4 Měření

6.4.1 Měřené veličiny

Pro porovnání výsledků z experimentu a analýzy odebraných vzorků plynu a dehtu se při každém měření zaznamenávají tato data:

- Frekvence měniče podávacího šneku (pro stanovení množství paliva)
- Teploty v různých místech zařízení (pomocí termočlánků)
- Tlaková diference dolní a horní části zařízení
- Tlaková diference na cloně (pro stanovení toku výstupního plynu)
- Tlak a teplota plynu na výstupu z reaktoru
- Ruční zaznamenávání průtoku a teploty zplyňovacího média

6.4.2 Odběr plynu

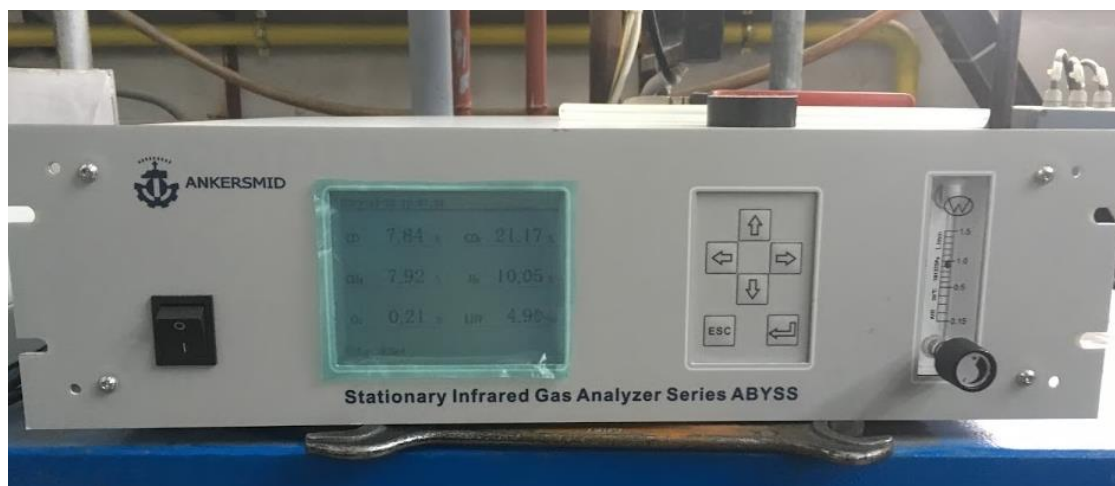
Složky výsledných plynů pro navržené režimy byly zaznamenávány a porovnány:

- on-line analyzátořem
- off-line odběry zanalyzovanými v chromatografu

6.4.2.1 On-line analyzátoř

On-line analyzátoř plynu přímo stanovuje procentuální zastoupení složek v plynu při měření. Jedná se o složení plynu, který projde mokrou vypířkou a cyklónem. Ručně byly z přístroje průběžně zapisovány procentuální hodnoty CO, CH₄, O₂, CO₂, H₂ a výhřevnost plynu LHV v MJ/m_n³.

Je to přenosné zařízení, které analyzuje plyn o průtoku 0,7-1,2 l/min. Regulace je možná jehlovým ventilem. Provozní teplota měřeného plynu se pohybuje v rozmezí 0-50 °C a jeho vstupní tlak 20-100 mbar. ^[17]



Obrázek 12 On-line analyzátoř plynu ^[17]

6.4.2.2 Off-line analýza

Kromě on-line zaznamenávání složení výsledného plynu byly odebířány jeho vzorky do vzorkovnic, tzv. myší. Poté byly poslány na analýzu do chemické laboratoře v chromatografu. Tato metoda je přesnější a podrobnější.

Vzorkovnice jsou ze skla a mají horní a dolní kohouty. Tyto myši byly nejprve zcela naplněny vodou. Je třeba vyvarovat se vzniku vzduchových bublin, protože by mohly

znehodnotit plyn. Takto předem nachystanými vzorkovnicemi se odebral plyn. Připojením teflonové hadičky plynu na horní konec myši plyn vytlačí přes otevřené kohoutky kapalinu dolním koncem. Pro správný odběr plynu musí být myš ve svislé poloze a nejdříve otevřený horní ventil, poté dolní ventil. Po odtečení veškeré vody se kohouty uzavřou, nejdříve spodní, poté horní. Tak se vytvoří přetlak, který zabraňuje kontaminaci plynu ve vzorkovnici. Pro různé režimy bylo pro lepší vyhodnocení odebráno více vzorků.



Obrázek 13 Ukázka vzorkovnic (myši) naplněných vodou

6.4.3 Dehet

Druhým odběrem pro porovnání nečistoty plynu je obsah dehtů. Byl opět odebírán v různých režimech podle hmotnostního průtoku vodní páry, vháněné do reaktoru. Plyn procházel přes odběrovou trubici do 4 promývaček, které byly propojené hadičkami. Kromě první promývačky se naplnily skleněnými kuličkami a všechny isopropylenem. Poté byly první dvě promývačky ponořeny do lázně se solankou a další dvě v lihu za běžícího plynoměru. Dehet se odebíral za průtoku 100 dm^3 plynu při daných režimech. Vzorky dehtů byly v chemických nádobách poslány na chemickou analýzu.

Dehet se vyskytuje ve formě páry nebo perzistentního aerosolu. Je vedlejším produktem procesu zplyňování, jehož hlavním zdrojem je prchavá hořlavina. Je to součet organických látek s bodem varu vyšším, než má benzen ($80,1 \text{ }^\circ\text{C}$). Obsahuje vyšší uhlovlodíky, dusíkaté látky, kyslíkaté a siřné sloučeniny a další. Tvorba množství dehtu závisí: ^[2]

- na typu zplyňovače
- teplotě v loži reaktoru
- teplotě plynu
- době setrvání plynu ve freeboardu
- na typu paliva (vlhkost, složení)

Dehet kondenzuje při nižších teplotách a na chladných površích tak vytváří nánosy, které mohou vést k ucpávání potrubí. Jeho produkce je nežádoucí, a proto je třeba ji redukovat. Ovšem některé složky dehtu mohou pozitivně ovlivnit výhřevnost vyrobeného plynu (1.-3.třída+benzen).^{[2][7]}

Dehty se klasifikují podle teploty počátku kondenzace a rozpustnosti ve vodě:^[2]

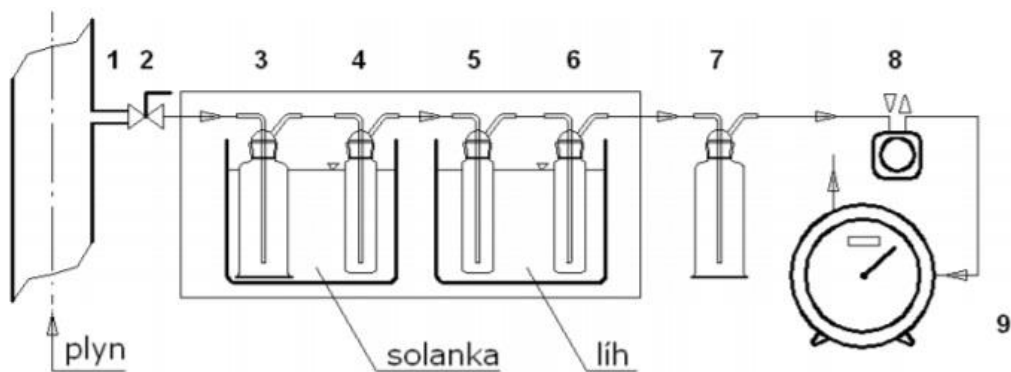
Tabulka 6 Klasifikace dehtů podle tříd^[2]

Třída	charakteristika	příklady složek
1	složky nezjistitelné plynovou chromatografií (GC) - kondenzují při vysokých teplotách ve velmi nízké koncentraci	fragmenty biomasy, nejtěžší dehet (smůla)
2	heterocyklické sloučeniny – vykazují vysokou rozpustnost ve vodě, velice reaktivní	fenol, kresol, quinolin, pyridin
3	aromatické složky – lehké uhlovodíky, které jsou důležité z hlediska reakčního spojení dehtu, ale ne příliš z hlediska kondenzace a rozpustnosti, vysoce těkavé, nízký rosný bod, zůstávají v plynném stavu	toluen, xylen, etylbenzen, styren, (mimo benzen, který není považován za dehet)
4	lehké polyaromatické uhlovodíky (2 – 3 kruhové PAH) – tyto sloučeniny kondenzují při relativně vysokých koncentracích při středních teplotách, majoritní skupina terciárního dehtu	naftalen, inden, bifenyl, antracen, methyl-naftalen, ethenyl-naftalen, acenafylen, acenaphten, fluoren, fenantren,
5	těžké polyaromatické uhlovodíky (≥ 4 kruhové PAH) – tyto sloučeniny mají nejvyšší kondenzační teplotu, přes své malé zastoupení (do 10 %) velice ovlivňují rosný bod dehtu	fluoranten, pyren, cysen benzo-anthracen; benzo-fluoranten; benzo-pyren; perylen; indeno-pyren; dibenzo-antracen; benzo-perylen
6	sloučeniny zjistitelné GC, avšak neidentifikovatelné	neznámé

Existuje publikace zvaná Tar Protocol, který definuje dehet a standardizuje metodu jeho odběru a analýzy. Popisuje odběrovou trať pro stanovení obsahu dehtů v plynu. Ta je složena z:^[2]

- odběrové sondy a prachového filtru
- série promývaček s absorbérem
- záložního sběrače zbytkového dehtu
- zařízení na podporu průtoku a měření množství protečeného plynu

V případě tohoto experimentu se použila upravená odběrová trať, která byla zjednodušená. Plyn byl vedený přes odběrovou trubici (1) přes kulový ventil (2) a teflonovou spojovací trubičku do sady promývaček s isopropanolem (3-6), které jsou spojeny teflonovou hadicí. Ve studené lázni ze solanky (asi -10 °C) byly chlazeny promývačky 3 a 4. A v lihové lázni (-39 °C) se chladily promývačky 5 a 6. Dále plyn procházel přes záložní filtrační promývačku (7) a čerpadlem (8) do bubnového plynoměru (9), z něhož vstupoval do atmosféry. Promývačky 3-5 byly naplněny skleněnými kuličkami o průměru 4-5 mm kvůli zvýšení přenosu tepla a hmoty.^[7]



Obrázek 14 Schéma zjednodušené odběrové trati pro dehet ^[7]

Dehet byl odebrán po 50-100 l plynu. Přelil se do vzorkových chemických nádob a poslal se na analýzu do chemické laboratoře. Promývačky a skleněné kuličky byly řádně propláchnuty a umyty pro jejich opětovné použití.



Obrázek 15 Promývačky před odběrem dehtu



Obrázek 16 Promývačky po odběru dehtu

Ukazatelem pro obsah dehtu v plynu je výtěžek dehtu, který je dán vztahem: ^[8]

$$c_{dehet} = c_{dehet_v_suchém_stavu} \cdot Y \quad (6.1)$$

Kde:

c_{dehet} – výtěžek dehtu [g/kg]

$c_{dehet_v_suchém_stavu}$ – obsah dehtu v suchém plynu [mg/m_n^3]

Y – výtěžek plynu [m_n^3/kg]

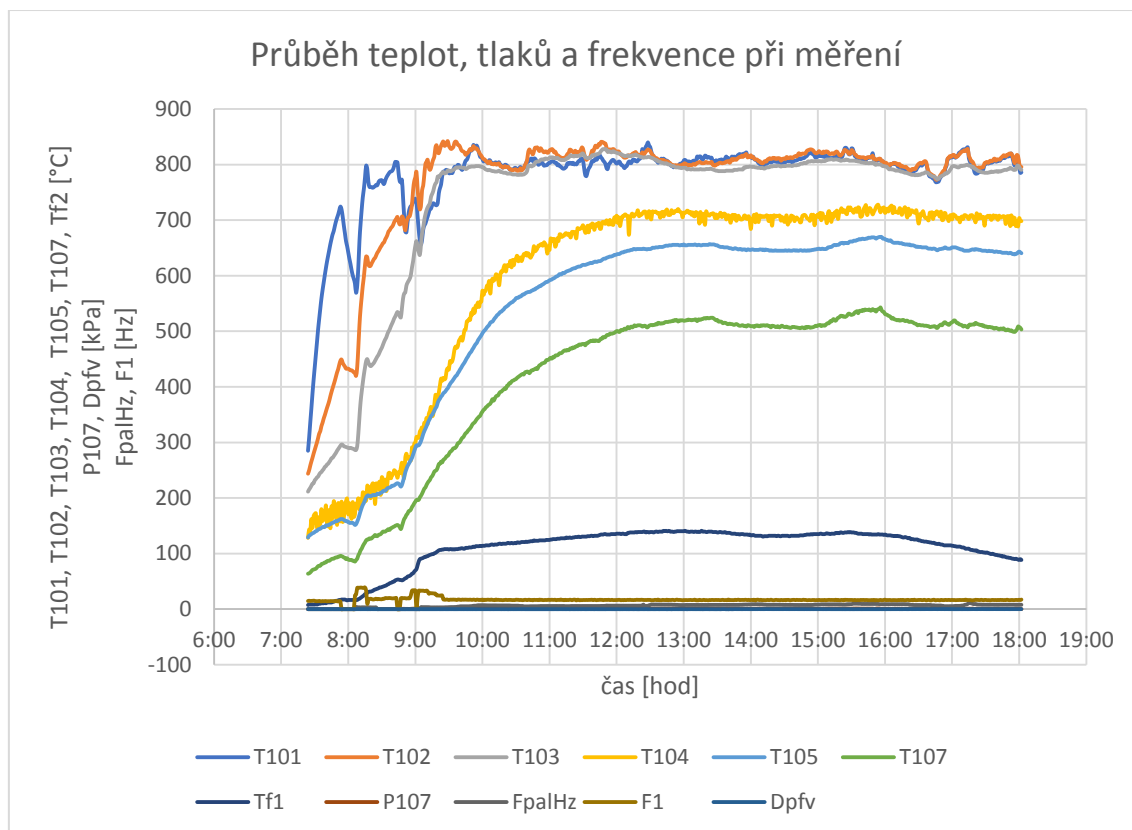
7 Experiment

Cílem experimentu bylo prověření vlivu přívodu různých množství vodní páry při konstantní výstupní teplotě plynu a vlivu výstupní teploty při konstantním vhnáném průtoku vodní páry.

7.1 Průběh

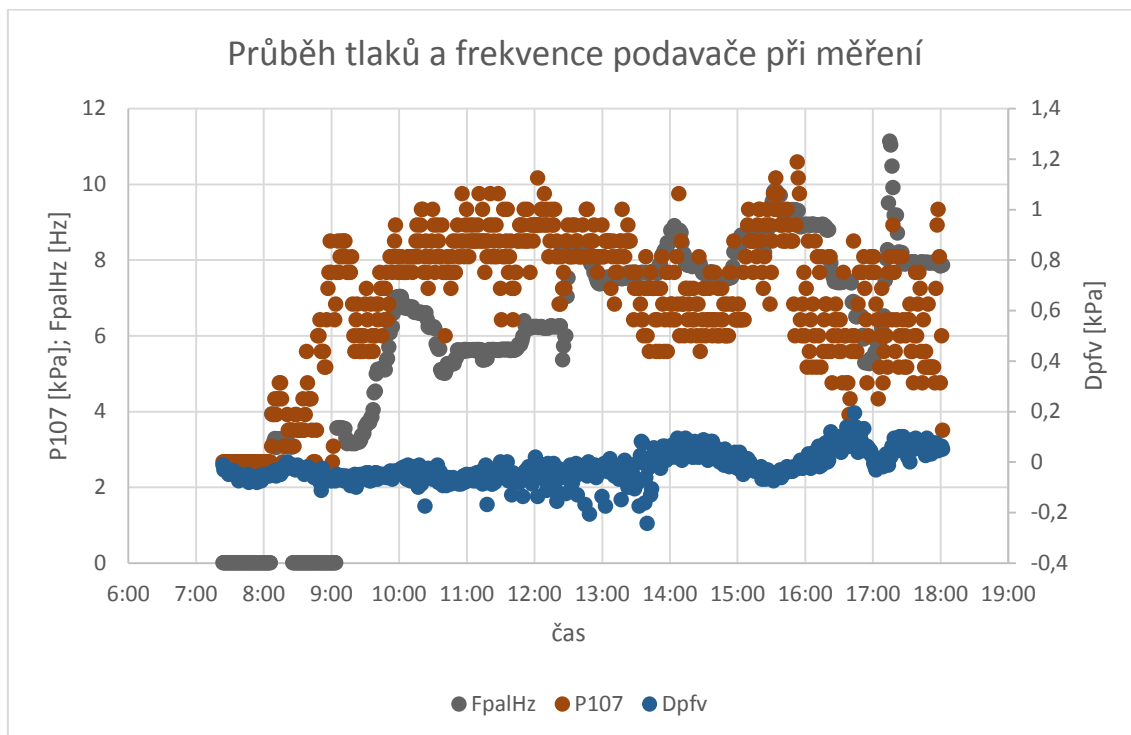
Experiment byl proveden 28. 3. 2019 na Energetickém ústavu FSI VUT v Brně na fluidním reaktoru Biofluid 100. Před samotným měřením bylo nezbytné najetí zařízení do ustáleného stavu za pomoci spalovacího režimu. Reaktor byl po zapálení v 7:24 zahříván na provozní teplotu. Ta byla v průběhu měření regulována na teplotu okolo 810 °C.

Na prvním grafu je zaznamenán průběh teplot zplyňovacího zařízení od najetí po vypnutí. Měření probíhalo od 7:24 do 18:02. Teplota T101 zobrazuje teplotu v loži, kterou bylo potřeba regulovat okolo 810 °C. A teplota T107 znázorňuje výstupní teplotu, jejíž vliv byl zkoumán při konstantním průtoku vodní páry.



Obrázek 17 Průběh teplot při měření

Na druhém grafu je znázorněn průběh tlaku v reaktoru (přetlak) P107 a tlaková diference fluidní vrstvy (Dpfv), která nebyla po celou dobu stabilní.



Obrázek 18 Průběh tlaků při měření

7.2 Experimentální podmínky

Teplota reaktoru byla udržována okolo 810 °C. Množství paliva přiváděného do reaktoru pro jeho zplynění bylo regulováno frekvencí šnekového podavače. Zplyňovacím médiem byl vzduch obohacený konstantním 4 % množstvím kyslíku s regulovaným tokem vodní páry H₂O.

Při měření byla zaznamenávána počítačem tato data:

- Frekvence měniče podávacího šneku (pro stanovení množství paliva)
- Teploty v různých místech zařízení (pomocí termočlánků)
- Tlaková diference dolní a horní části zařízení
- Tlaková diference na cloně (pro stanovení toku výstupního plynu)
- Tlak a teplota plynu na výstupu z reaktoru

Ručně byly zaznamenávány z přístrojů parametry vzduchu. V tabulce jsou zobrazeny jeho experimentální podmínky pro jednotlivé režimy:

Tabulka 7 Parametry přiváděného vzduchu do reaktoru při režimech měření

Režim	\dot{V}_{vzd} [m ³ /h]	T_{vzd} [°C]	p_{vzd} [kPa]
1	19	62,8	40
2	19	63,6	40
3	19	63,5	40
4	19	63,9	40
5	19	63,2	40

Měření proběhlo v 5 režimech, kdy byl regulován hmotnostní tok vodní páry nebo teplota výstupního plynu:

- 1) $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}=12 \text{ kg/h}$, $T_{\text{výstup}}=500 \text{ °C}$
- 2) $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}=8 \text{ kg/h}$, $T_{\text{výstup}}=500 \text{ °C}$
- 3) $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}=4 \text{ kg/h}$, $T_{\text{výstup}}=500 \text{ °C}$
- 4) $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}=8 \text{ kg/h}$, $T_{\text{výstup}}=600 \text{ °C}$
- 5) $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}=0 \text{ kg/h}$, $T_{\text{výstup}}=400 \text{ °C}$

7.3 Palivo

V reaktoru byla zplyňována dřevní štěpka ze smrkového dřeva. Toto předem nadrcené palivo bylo manuálně dodáváno do zásobníku paliva, přičemž jeho množství jdoucí do reaktoru bylo regulováno otáčkami (frekvencí) šnekového podavače. Popel z paliva byl odváděn do nádoby pod roštem.

Parametry vyrobeného energoplynu ovlivňuje typ použité biomasy, a proto je nutný i její rozbor:

- 1) Z odebraného vzorku paliva bylo v experimentální palivové laboratoři na VUT pomocí kalorimetru zjištěno spalné teplo:

$$Q_s=17,8 \text{ MJ/kg}$$

- 2) Z odebraného vzorku paliva byl v experimentální palivové laboratoři na VUT pomocí halogenové sušící váhy zjištěn obsah vody v palivu:

$$W^r=12,73 \%$$

- 3) Prvkový rozbor smrkové štěpky z databáze Phyllis:

Tabulka 8 Prvkový rozbor smrkové štěpky

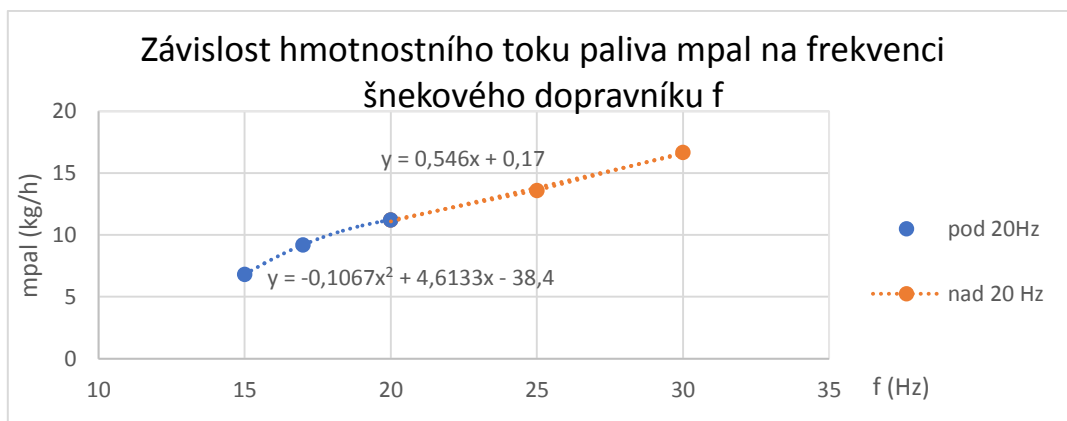
Typ paliva	smrková štěpka	
Obsah vlhkosti W^r	%hm.	12,75
Obsah popela A^r	%hm.	0,17
Prchavá hořlavina h^{daf}	%hm.	77,95
Pevný uhlík	%hm.	8,87
Uhlík	%hm.	41,16
Vodík	%hm.	5,47
Dusík	%hm.	0,06
Kyslík	%hm.	40,11

Pro stanovení množství přívodu paliva do zplyňovacího zařízení byla provedena podávací zkouška. Ta stanovila závislost množství paliva na otáčkách šnekového podavače, který dopravuje palivo do reaktoru. Výsledky této zkoušky jsou znázorněny v tabulce a na sobě závislé veličiny v grafu.

Tabulka 9 Hodnoty naměřené při podávací zkoušce

f [Hz]	\dot{m}_{pal} [kg/h]
15	6,8
17	9,2
20	11,2
25	13,6
30	16,66

Z grafu vyplývá, že závislost hmotnostního toku paliva na frekvenci podavače je nad 20 Hz lineární a pod 20 Hz polynommická. Rovnice pro výpočet množství paliva podle této závislosti jsou rovněž zobrazeny v grafu.



Obrázek 19 Graf závislosti hmotnostního toku paliva na frekvenci šnekového dopravníku

Díky této podávací zkoušce šnekového dopravníku byl stanoven hmotnostní tok paliva v jednotlivých časech odběru plynu. Hodnoty přepočtu množství smrkové štěpky jsou zobrazeny v tabulce.

Tabulka 10 Výpočet hmotnostního toku paliva a poměru P/B

Vzorek plynu	Čas odběru	$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$ [kg/h]	T [°C]	T_{reaktor} [°C]	f [Hz]	\dot{m}_{pal} [kg/h]	$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O, pal}}$ [kg/h]	P/B [-]
1	11:00	12	500	802,50	18,19	10,21	1,30	1,30
2	11:15	12	500	796,50	17,89	9,98	1,27	1,33
3	11:24	12	500	800,25	18,00	10,07	1,28	1,32
4	12:00	12	500	801,75	19,80	11,11	1,41	1,21
5	12:15	12	500	809,25	19,80	11,11	1,41	1,21
6	12:45	8	500	807,00	24,19	13,38	1,70	0,73
7	13:05	8	500	805,50	22,50	12,46	1,59	0,77
8	13:20	8	500	815,25	22,80	12,62	1,61	0,76
9	14:20	4	500	807,00	23,48	12,99	1,65	0,44
10	14:30	4	500	804,00	23,10	12,78	1,63	0,44
11	14:50	4	500	815,25	22,80	12,62	1,61	0,44
13	15:45	8	600	812,25	26,89	14,85	1,89	0,67
15	17:37	0	400	805,50	23,59	13,05	1,66	0,13
16	17:47	0	400	811,50	23,59	13,05	1,66	0,13
17	17:50	0	400	814,50	23,59	13,05	1,66	0,13

Poměry páry ku biomase byly vypočítány podle vzorce. Do tohoto ukazatele je zahrnuto množství vody v palivu, které bylo stanoveno dle vlhkosti vzorku paliva ($W^r=12,73\%$). Příklad výpočtu pro první vzorek:

$$\dot{m}_{H_2O,pal} = \frac{\dot{m}_{pal} \cdot W^r}{100} = \frac{10,21 \cdot 12,73}{100} = 1,30 \text{ kg/h}$$

$$\frac{P}{B} = \frac{\text{pára}}{\text{biomasa}} = \frac{\dot{m}_{voda.v.palivu} + \dot{m}_{voda.v.páře}}{\dot{m}_{palivo}} = \frac{1,30 \cdot 12}{10,21} = 1,3$$

7.4 Složení plynu

7.4.1 Off-line analýza

Při jednotlivých režimech byly odebrány vzorky plynů do skleněných vzorkovnic. Tyto vzorkovnice byly nejdříve zcela naplněny vodou. Mělo se zamezit tvorbě bublin uvnitř vzorkovnic kvůli případnému znehodnocení odebraného plynu. Při každém režimu bylo odebráno více vzorků pro lepší vyhodnocení výsledků. Celkově bylo na analýzu do chemické laboratoře posláno 17 vzorkovnic s plynem. Analýza složení plynu byla provedena v chromatografu. Plyny č. 12 a 14 nebyly započítány do vyhodnocení kvůli špatnému odběru. Výsledky této metody jsou zobrazeny v tabulce. Složky uhlovodíků byly sloučeny do jedné sumy mimo metan CH_4 .

Tabulka 11 Složky plynu off-line

Čas	Vz. pl.	\dot{m}_{H_2O} [kg/h]	T [°C]	H_2 [%]	CO_2 [%]	C_xH_y [%]	O_2 [%]	N_2 [%]	CH_4 [%]	CO [%]	LHV [MJ/m ³]
11:00	1	12	500	9,214	21,499	0,687	0,075	56,725	3,629	7,801	3,48
11:15	2	12	500	10,237	22,781	0,867	0,076	54,577	1,964	9,069	3,26
11:24	3	12	500	10,403	23,444	0,697	0,101	55,365	2,383	7,42	3,14
12:00	4	12	500	11,335	23,605	0,808	0,101	53,94	2,386	7,711	3,33
12:15	5	12	500	10,861	24,073	0,703	0,145	54,659	2,143	7,347	3,09
12:45	6	8	500	14,529	23,975	0,979	0,161	48,861	2,518	8,93	3,94
13:05	7	8	500	14,871	24,003	0,981	0,176	48,906	2,421	8,611	3,91
13:20	8	8	500	15,199	24,366	1,070	0,19	48,400	2,493	8,269	3,98
14:20	9	4	500	15,178	24,148	0,626	0,196	49,879	1,886	8,08	3,50
14:30	10	4	500	14,85	23,779	0,730	0,196	49,139	2,138	9,164	3,74
14:50	11	4	500	17,094	25,632	0,563	0,193	48,465	1,793	6,259	3,42
15:45	13	8	600	16,155	24,695	1,001	0,221	46,945	2,362	8,62	4,03
17:37	15	0	400	11,31	21,986	0,623	0,217	53,223	1,775	10,865	3,40
17:47	16	0	400	12,509	21,999	0,582	0,206	52,848	1,772	10,085	3,41
17:50	17	0	400	11,417	22,248	0,587	0,224	53,784	1,802	9,936	3,29

7.4.2 On-line analýza

On-line analýza složek plynu byla zaznamenávána na přístroji v procentuálních hodnotách v průběhu experimentu. Jedná se o CO , CH_4 , O_2 , CO_2 , H_2 a výhřevnost LHV. Tyto hodnoty byly průběžně ručně zapisovány při každém režimu zplyňování. Jejich naměřené hodnoty jsou v tabulce.

Tabulka 12 Složení plynu on-line

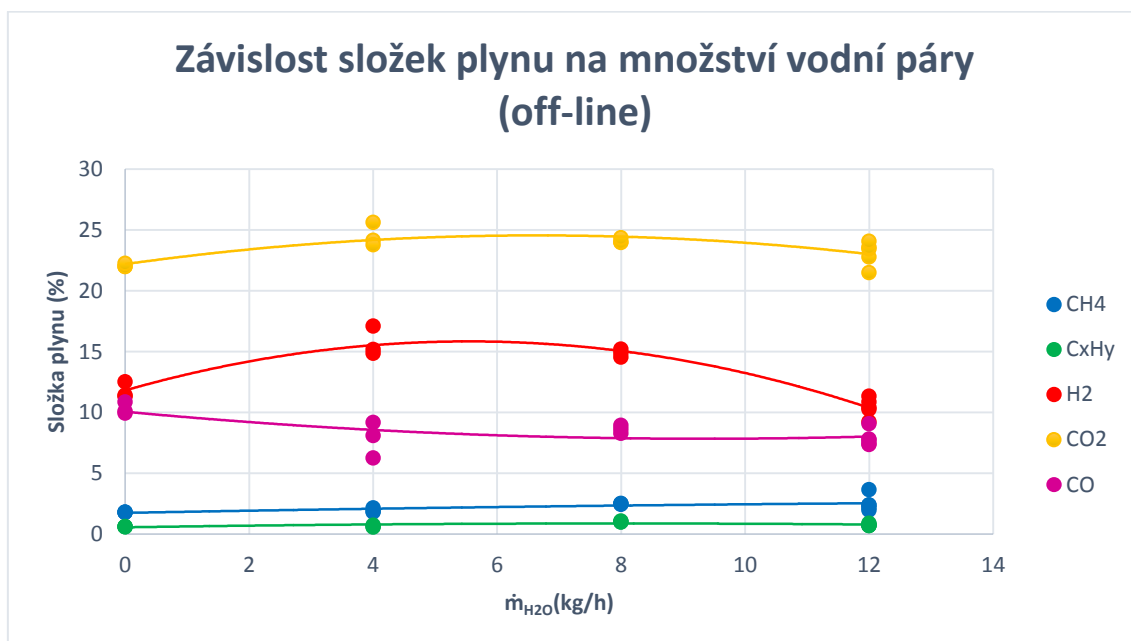
čas	\dot{m}_{H_2O} [kg/h]	T [°C]	CO [%]	CH ₄ [%]	O ₂ [%]	CO ₂ [%]	H ₂ [%]	LHV [MJ/m _n ³]
10:08	12	500	10,12	9,41	0,24	20,62	11,3	5,23
10:14	12	500	8,7	8,42	0,2	20,96	9,99	4,88
10:20	12	500	8,78	8,2	0,2	21,29	10,51	4,6
10:25	12	500	8,96	8,31	0,18	21,04	10,43	5,02
10:31	12	500	7,42	6,77	0,18	21,34	9,98	4,72
10:36	12	500	9,36	6,81	0,18	22,19	9,62	4,01
10:46	12	500	6,97	6,19	0,17	21,82	8,51	4,18
11:05	12	500	7,39	6,06	0,13	22,78	9,9	4,42
11:16	12	500	6,44	5,01	0,14	23,34	8,41	3,19
11:30	12	500	4,9	4	0,14	20,5	8,5	3,2
11:47	12	500	6,51	3,02	0,16	24,3	9,58	2,85
12:17	12	500	7,61	4,92	0,2	16,79	11,15	4,01
12:35	8	500	10,22	5,1	0,16	16,58	14,66	4,18
13:03	8	500	9,32	4,1	0	16,29	15,13	4,28
13:14	8	500	8,3	3,34	0,03	16,29	14,73	3,7
13:32	4	500	7,18	3,35	0	16,5	13,6	3,86
13:38	4	500	8,96	4,1	0,02	16,02	15,9	4,31
13:43	4	500	7,44	2,39	0	16,34	14,12	3,84
13:48	4	500	7,93	3,34	0	16,23	14,56	3,87
13:59	4	500	9,05	4,68	0	16,08	15,35	4,12
14:03	4	500	9,16	6,56	0	16,16	15,13	4,92
14:09	4	500	9,35	4,9	0	16,26	16,15	4,22
14:21	4	500	8,82	4,2	0	16,37	15,35	3,9
14:26	4	500	7,62	5,11	0	15,96	13,78	4,58
14:41	4	500	7,95	5,57	0	15,81	14,2	4,64
14:48	4	500	8,41	3,7	0	16,18	14,91	3,93
15:40	8	600	9,35	6,55	0	15,96	15	5,08
15:45	8	600	8,66	4,5	0	15,98	15,32	4,59
17:23	0	400	9,92	4,99	0	14,9	12,84	4,21
17:29	0	400	9,59	4,54	0	14,45	11,88	4,15
17:38	0	400	9,79	3,99	0	13,94	12	4,35
17:45	0	400	10,01	4,81	0,01	14,18	12,42	4,05
17:55	0	400	8,29	4,34	0	12,13	11,72	4,78

7.4.3 Vliv množství vodní páry H₂O

Jedním z úkolů bylo prověřit vlivy přivodu vodní páry na složení jednotlivých složek výsledného plynu. Tyto závislosti z off-line analýzy jsou zobrazeny v následujícím grafu.

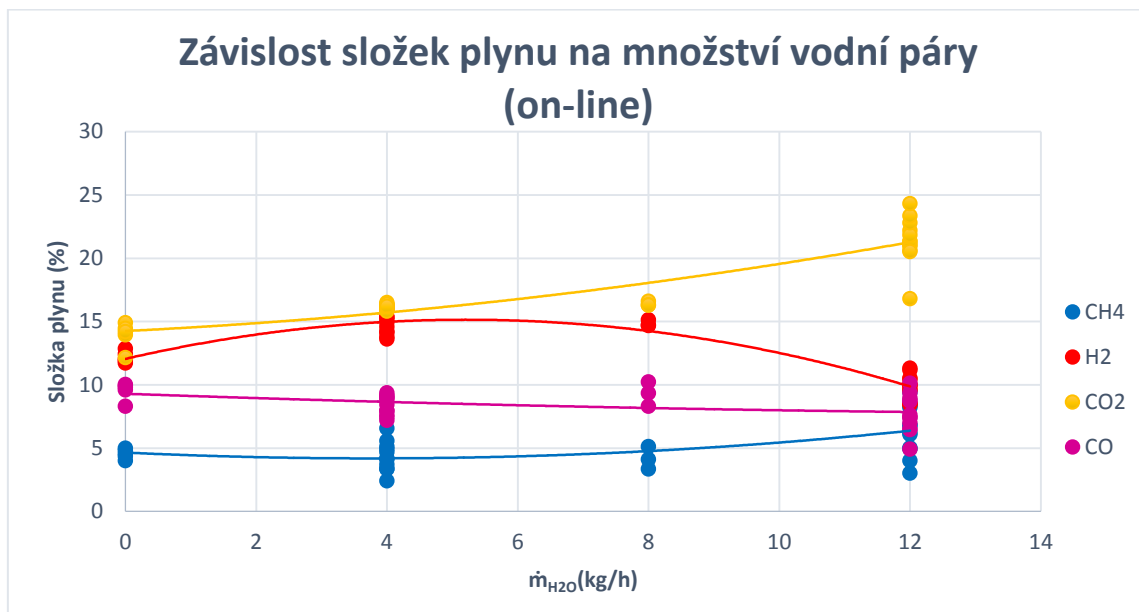
Z grafu lze odvodit, jak množství přivedené vodní páry do reaktoru ovlivňuje složení výsledného plynu. Jsou zde zahrnuty hmotnostní průtoky vodní páry 12, 8 a 4 kg/h při teplotě 500 °C a 0 kg/h při teplotě 400 °C. V tomto případě nižší teplota u nulového průtoku vodní páry má zanedbatelný vliv na procentuální obsah jednotlivých složek plynu.

Zhruba z 50 % je vyrobený plyn tvořený dusíkem N₂. Nejvyšší procentuální složkou je kyslík O₂. Nejvýrazněji se pohybují hodnoty vodíku H₂, jehož nejvyšší hodnota byla naměřena při hmotnostním průtoku vodní páry 4 kg/h. Při stejném přidavku vodní páry byl naměřen i nejvyšší podíl oxidu uhličitého CO₂. Pro lepší vyhodnocení průběhu H₂ a CO₂ by bylo vhodné proměření při 6 kg/h vodní páry. Hodnoty oxidu uhelnatého s přidavkem H₂O mírně klesají. Nejvyšší procentuální zastoupení v grafu mají uhlovodíky, z nichž je nejvýraznější metan. Oproti jiným složkám se zdají být poměrně konstantní.



Obrázek 20 Graf závislosti složek jednotlivých plynů z off-line analýzy na hmotnostním průtoku vodní páry

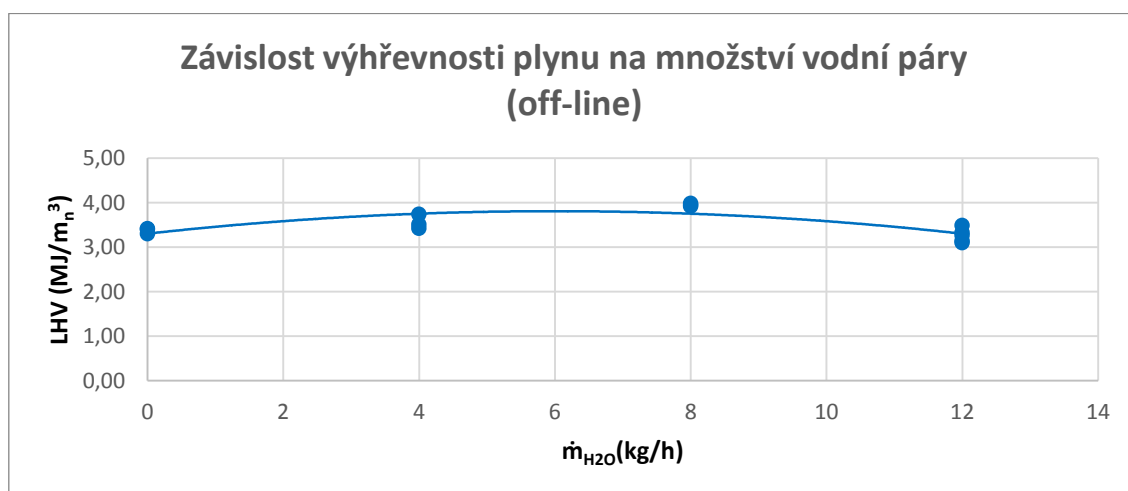
Jak ovlivnil průtok vodní páry složení plynu podle on-line analyzátoru je zobrazeno v dalším grafu. Na něm jsou vyneseny složky plynu CH₄, H₂, CO₂ a CO, ze kterých je majoritní podíl zastoupený oxidem uhličitým CO₂. Nejvyšších hodnot dosahuje při průtoku 12 kg/h vodní páry. Vodík H₂ naopak dosahuje nejvyšších hodnot při 4 kg/h vodní páry jako u off-line metody. Co se týče oxidu uhelnatého CO, tak i v tomto případě mírně klesá. Metan CH₄, je zde nejvíce kontroverzní složkou. Při 12 kg/h byla jeho hodnota nejvyšší.



Obrázek 21 Graf závislosti složek jednotlivých plynů z on-line analýzy na hmotnostním průtoku vodní páry

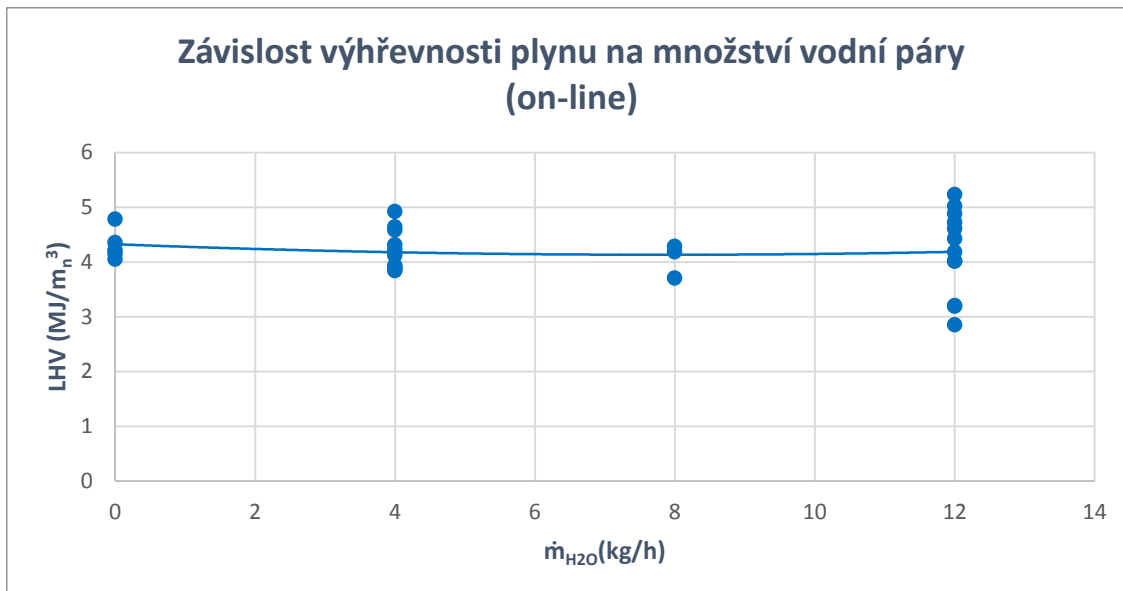
Při srovnání grafů složek plynů odebraných off-line a on-line, lze pozorovat jisté odlišnosti. Liší se v případě oxidu uhličitého CO₂. Ten dosahuje nejvyššího podílu podle odebraných vzorků při 4 kg/h vodní páry a podle on-line analyzátoru při 12 kg/h vodní páry. Rozdíl je rovněž zjevný u metanu CH₄. Průběh vytvořený off-line výsledky je skoro konstantní, na rozdíl od průběhu on-line výsledků. Téměř shodné procentuální podíly lze pozorovat u vodíku H₂ a oxidu uhelnatého CO. Přesnější analýzu složek přináší off-line metoda pomocí chromatografu.

Důležitým parametrem pro další využití vyrobeného plynu je výhřevnost. Její vypočítané hodnoty jsou vyneseny v grafech v závislosti na hmotnostním průtoku vodní páry. Výhřevnost jednotlivých vzorků plynů byla vypočítaná na základě procentuálního složení off-line analýzou a jejich hodnot spalného tepla. Z grafu lze odvodit, že nejvyšších hodnot výhřevnosti dosahovaly vzorky plynu při 8 kg/h. Ovšem celkově se LHV pohybuje v rozmezí 3–4 MJ/m_n³.



Obrázek 22 Graf závislosti výhřevnosti plynu na množství vodní páry (off-line)

Pomocí on-line analyzátoru byla ručně zaznamenávána kromě procentuálních složek plynu i výhřevnost. Bohužel tato metoda se ukázala jako nepřesná. Nelze jednoznačně určit při jakém průtoku vodní páry je výhřevnost optimální, jak lze vidět i z grafu. Hodnoty LHV se v tomto případě pohybují nejvíce v rozmezí 4–5 MJ/ m_n³.

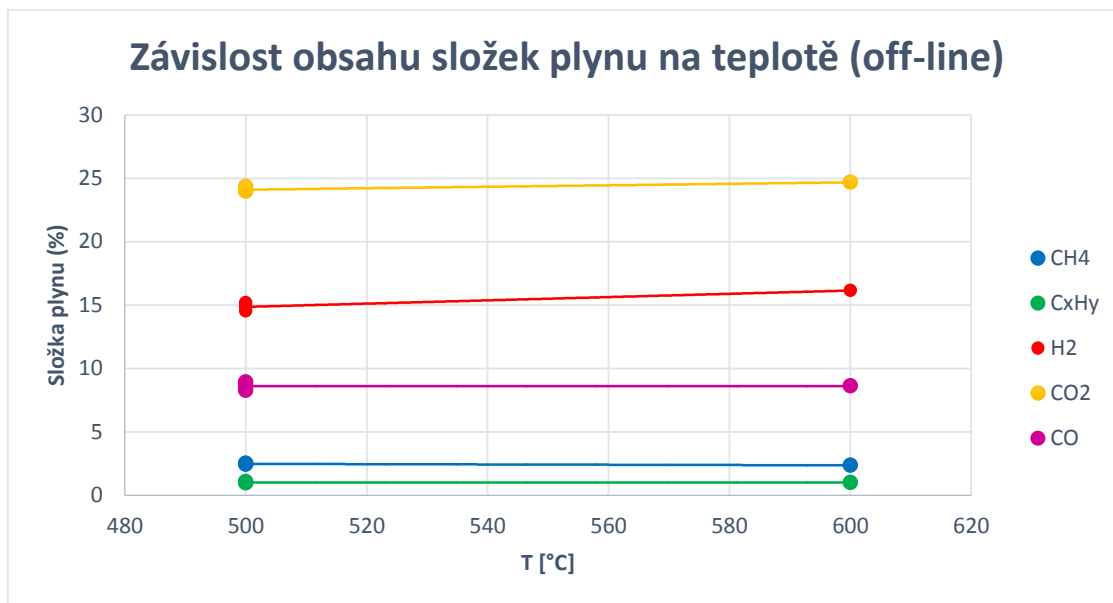


Obrázek 23 Graf závislosti výhřevnosti plynu na množství vodní páry (on-line)

Jelikož hodnoty výhřevnosti získané on-line analýzou nejsou relevantní, k srovnání s off-line analýzou není přikládán jejich velký význam. Rozmezí LHV off-line se pohybuje nejvíce mezi 3-4 MJ/kg, oproti LHV on-line s rozmezím mezi 4-5 MJ/kg. Zásadní jsou tedy vypočítané výsledky z off-line analýzy, ze kterých vyplývá optimální průtok vodní páry mezi 4-8 kg/h. Pro lepší vyvození závěrů ze závislostí by bylo vhodné proměření při 6 kg/h přidavku vodní páry.

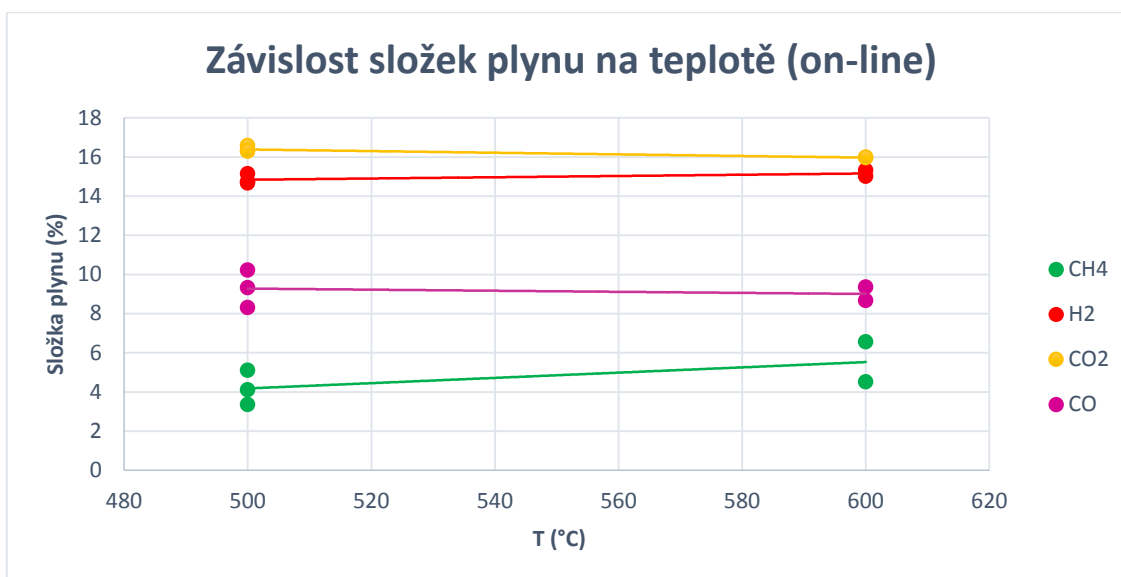
7.4.4 Vliv teploty

Při zvoleném průtoku vodní páry 8 kg/h proběhlo měření za teplot 500 °C a 600 °C kvůli zjištění jejich vlivu na vyrobený plyn. Celkem byly odebrány tři vzorky plynu při teplotě 500 °C a pouze jeden použitelný vzorek při teplotě 600 °C. Pro málo naměřených dat nelze jednoznačně určit vliv teploty na jednotlivé složky plynu off-line metodou. Nicméně z těchto zanalyzovaných a zpracovaných vzorků vyplývá, že teplota nemá na podíl uhlovodíku, včetně metanu, a oxidu uhelnatého téměř žádný vliv. Podle grafu lze říci, že jejich procentuální hodnoty jsou konstantní. To ovšem už zcela neplatí pro vodík a oxid uhelnatý, jejichž podíly s rostoucí teplotou stoupají. Pro lepší vyvození závislosti by bylo potřeba odebrat více vzorků u teploty 600 °C a proměření při dalších teplotách.



Obrázek 24 Závislost obsahu složek plynu na výstupní teplotě (off-line)

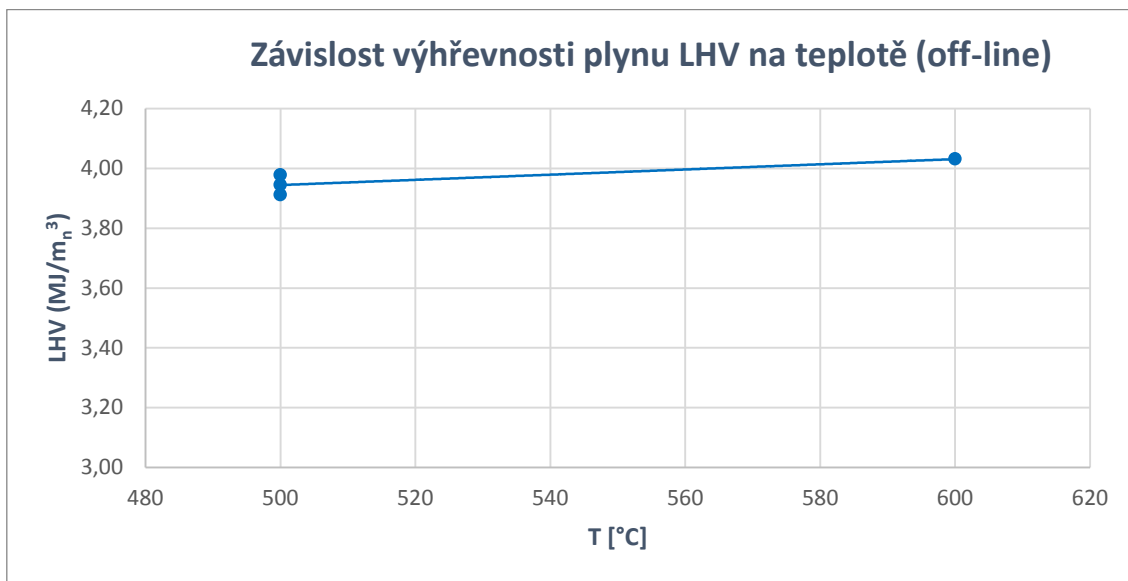
V dalším grafu je zobrazena závislost obsahu složek plynu na teplotě pomocí on-line analyzátoru. Podle on-line zaznamenávání hodnot se zdají být naopak konstantní podíly CO₂, H₂ a CO, které se téměř nemění. Mírný nárůst se zvyšující se teplotou oproti jiným složkám je zaznamenán u metanu CH₄. Ovšem pro přesnější výsledky je vhodnější off-line metoda.



Obrázek 25 Závislost obsahu složek plynu na výstupní teplotě (on-line)

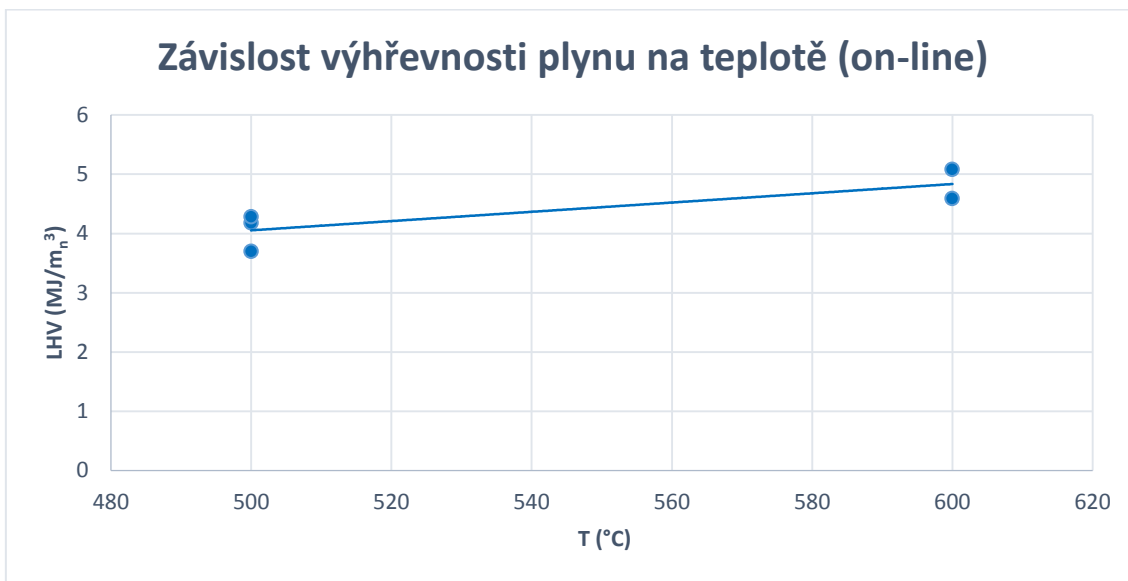
Vliv změny teploty na výhřevnost při konstantním průtoku vodní páry lze porovnat opět vypočítanými hodnotami z off-line odběrů plynu s on-line zaznamenáváním při měření.

Ze závislosti výhřevnosti plynu LHV na teplotě off-line metodou lze vyvodit, že s rostoucí teplotou výhřevnost velmi mírně stoupá. Její hodnota se pohybuje kolem 4 MJ/m_n^3 .



Obrázek 26 Závislost výhřevnosti plynu LHV na výstupní teplotě (off-line)

Tyto výsledky se mohou porovnat s následujícím grafem, který zobrazuje opět závislost výhřevnosti plynu na teplotě, ale tentokrát on-line metodou. Tento graf vytvořený z hodnot on-line analyzátoru zaznamenává rovněž nárůst výhřevnosti se zvyšující se teplotou v rozmezí asi 4-5 MJ/kg.



Obrázek 27 Závislost výhřevnosti plynu LHV na výstupní teplotě (on-line)

Kvůli nedostatku dat off-line metodou a nepřesností on-line metodou nelze jednoznačně říci, jak velký vliv má teplota na výhřevnost vyrobeného plynu. Vycházíme-li z údajů, které jsou k dispozici díky experimentálnímu měření, tak lze vyvodit, že hodnota výhřevnosti plynu má tendenci s rostoucí teplotou stoupat.

7.5 Dehet

Byly odebrány 4 vzorky dehtů při:

- | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|---|----|------------------|
| 1) $m_{\text{H}_2\text{O}}=12 \text{ kg/h}$, $T_{\text{výstup}}=500 \text{ }^\circ\text{C}$ | → | D1 | (za 100 l plynu) |
| 2) $m_{\text{H}_2\text{O}}=8 \text{ kg/h}$, $T_{\text{výstup}}=500 \text{ }^\circ\text{C}$ | → | D2 | (za 100 l plynu) |
| 3) $m_{\text{H}_2\text{O}}=4 \text{ kg/h}$, $T_{\text{výstup}}=500 \text{ }^\circ\text{C}$ | → | D3 | (za 100 l plynu) |
| 4) $m_{\text{H}_2\text{O}}=0 \text{ kg/h}$, $T_{\text{výstup}}=400 \text{ }^\circ\text{C}$ | → | D4 | (za 50 l plynu) |

Cílem je prozkoumat vliv přívodu vodní páry jako zplyňovacího činidla do reaktoru na tvorbu dehtů. Odběr byl proveden v souladu s Tar protocoem. Dehet byl odbírán pomocí zjednodušené odběrové tratě při průchodu 100 l vyrobeného plynu. Poslední dehet se odebíral již za objemového průtoku 50 l plynu. Z promývaček se vzorky odlily do nádob a byly poslány na analýzu do chemické laboratoře. Zde pomocí chromatografu bylo zjištěno složení jednotlivých vzorků dehtu.

V tabulce jsou popsány experimentální podmínky odběrů dehtu. Teplota $\Delta T_{\text{reaktor}}$ je rozdílem nejvyšší a nejnižší zaznamenané teploty v reaktoru. Tato hodnota je největší u 4. vzorku dehtu, při jehož odběru byla nejnižší zaznamenaná teplota reaktoru $783,75 \text{ }^\circ\text{C}$. To mohlo ovlivnit složení tohoto odebraného dehtu.

Tabulka 13 Tabulka podmínek odběrů dehtů

Odběr dehtu	Čas	$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$ [kg/h]	T [°C]	Objem plynu [l]	T_{reaktor} [°C]	$\Delta T_{\text{reaktor}}$ [°C]
1	11:45 - 12:15	12	500	100	803,25	24,75
2	12:45 - 13:20	8	500	100	805,25	21
3	14:20 - 14:50	4	500	100	807,19	14,25
4	17:15 - 17:47	0	400	50	800,11	30,75

7.5.1 Analýza dehtu

Po analýze vzorků dehtu pomocí chromatografu byly zjištěny jejich procentuální podíly složek. Tyto složky bylo potřeba rozdělit do jednotlivých tříd podle Tar protocolu. Poté byly vypočítány sumy jednotlivých tříd pro navržené průtoky vodní páry (0, 4, 8, 12 kg/h).



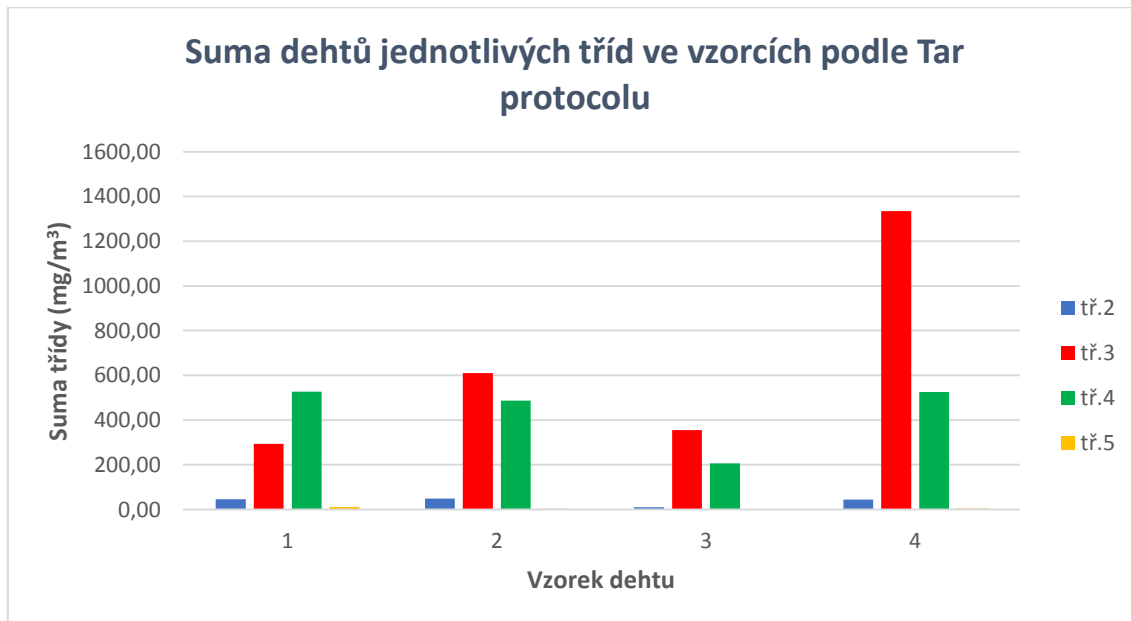
Obrázek 28 Odebrané vzorky dehtu

Tabulka 14 Složky jednotlivých odběrů dehtů rozdělených do tříd podle Tar protocolu

Odběr dehtu	1	2	3	4
Hmotnostní tok vodní páry [kg/h]	12	8	4	0
Třída 2 [mg/m³]				
Benzofurany	13,57	31,40	7,41	39,28
Dibenzofurany	22,37	14,71	2,34	4,52
quinolin	5,54	2,12	0,50	0,67
Isoquinolin	4,43	1,14	0,20	0,00
Suma třídy 2	45,92	49,37	10,45	44,46
Třída 3 [mg/m³]				
Benzen	667,16	1661,99	1134,46	3430,07
Toluen	177,64	420,36	253,00	927,58
m,p-xylen	20,36	21,75	16,85	44,44
o-xylen	96,08	168,19	85,89	362,84
Suma třídy 3 (bez benzenu)	294,08	610,30	355,73	1334,86
Třída 4 [mg/m³]				
Inden	39,28	98,27	47,48	214,46
Indan	1,17	0,58	0,28	1,41
Naftalen	310,27	288,17	137,92	260,10
Bifenyl	16,96	13,24	3,36	5,77
Acenaftylen	55,83	42,74	10,55	20,34
Acenaften	4,78	3,54	1,08	2,54
Fluoren	21,34	8,70	1,83	5,58
Fenantren	49,63	20,10	2,18	7,89
Antracen	10,76	4,49	0,54	2,71
Methylfenantreny	1,79	0,74	0,08	0,39
Fluoranthen	7,72	2,30	0,33	2,03
PAU (m/z=165,166)	7,93	3,59	1,11	1,76
Suma třídy 4	527,47	486,45	206,74	524,99
Třída 5 [mg/m³]				
Pyren	6,06	1,84	0,30	2,20
Benzfluoreny	1,12	0,45	0,00	0,50
PAU o 4 kruzích (m/z=226,228)	2,87	0,85	0,08	0,74
PAU o 5 kruzích (m/z=252)	0,94	0,41	0,03	0,58
PAU o 6 kruzích (m/z=276)	0,39	0,16	0,00	0,19
Suma třídy 5	11,38	3,71	0,41	4,21
Sumarizované hodnoty [mg/m³]				
Suma dehtů (bez BTEX)	584,76	539,53	217,61	573,67
Suma BTEX (s benzenem)	961,24	2272,29	1490,19	4764,93
Suma dehtů podle Tar protocolu (bez benzenu)	878,85	1149,83	573,34	1908,52

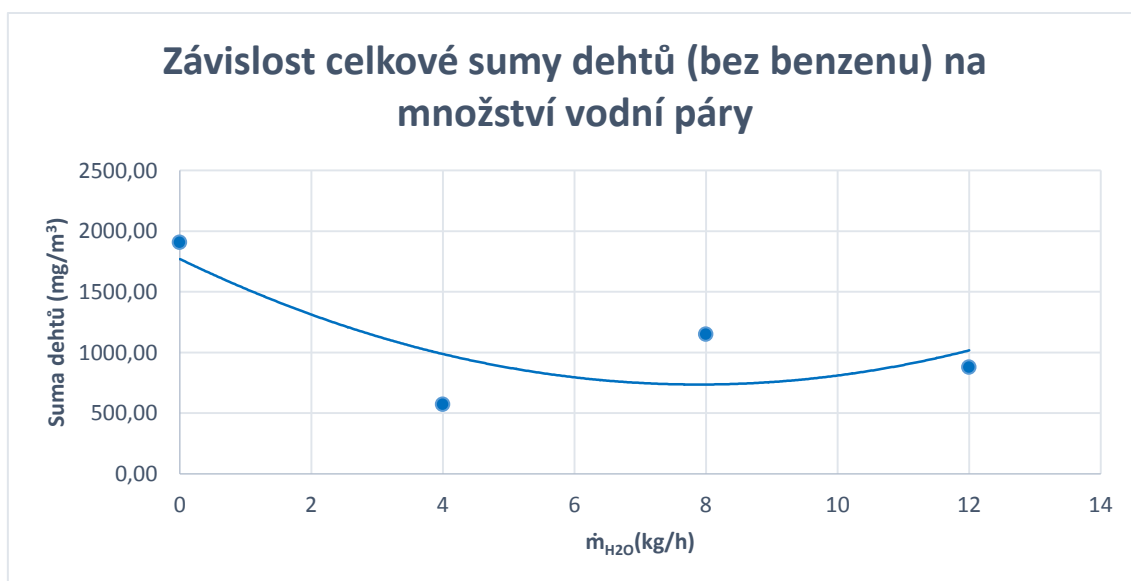
Z hodnot v tabulce byly sestaveny grafy závislostí sumy dehtů jednotlivých tříd ve vzorcích 1-4 a celkových sum dehtů jednotlivých vzorků na množství průtoku vodní páry. V grafu jsou zobrazeny všechny čtyři odebrané vzorky dehtu a jejich sumy složek rozdělených podle tříd. Obecně největší podíly zastupují složky 3. a 4. třídy. Sumy 2.

a 3. třídy jsou v porovnání s nimi zanedbatelné. Ovšem vliv na tyto hodnoty mohla mít průběžná teplota reaktoru.



Obrázek 29 Suma dehtů jednotlivých tříd ve vzorcích podle Tar protocolu

Vzorky dehtu byly odebrány při čtyřech různých průtocích přidavků vodní páry jakožto zplyňovací činidla (0, 4, 8, 12 kg/h). Výpočtem sumy všech složek dehtu (mimo benzenu) každého odebraného vzorku byla vytvořena jejich závislost na množství H_2O . Největší podíl dehtu v energoplynu obsahoval vzorek odebraný při nulovém průtoku vodní páry. Z grafu ovšem nelze určit jednoznačnou závislost. Lze tedy vyvodit, že podíl dehtu ve vyrobeném plynu nezávisí na hmotnostním průtoku vodní páry vháněné do reaktoru. Ovšem teplota reaktoru měla být udržována okolo $810\text{ }^{\circ}\text{C}$. Počítač zaznamenával tuto teplotu každou minutu. V určitém časovém rozmezí při odběru 4. vzorku dehtu byla tato teplota nižší, což mohlo ovlivnit tyto výsledky.



Obrázek 30 Závislost sumy dehtů podle Tar protocolu (bez benzenu) na hmotnostním průtoku vodní páry

Ukazatelem pro obsah dehtu v plynu je výtěžek dehtu, který je dán vztahem:

$$c_{dehet} = c_{dehet_v_suchém_stavu} \cdot Y$$

Tabulka 15 Výtěžek dehtu

Dehet	Čas	Suma dehtů [mg/m ³]	\bar{Y} [m ³ _{n (plyn)} /kg _(pal)]	c [g/kg]
1	11:45 – 12:15	878,85	3,36	2,95
2	12:45 – 13:20	1149,83	3,14	3,61
3	14:20 – 14:50	573,34	2,89	1,66
4	17:15 – 17:47	1908,52	2,42	4,62

Příklad výpočtu pro 1. vzorek dehtu:

- Výtěžky vzorků plynů odebírané při odběru dehtu 1 byly zprůměrovány:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_i^n Y}{n} = \frac{3,68 + 3,65}{2} = 3,36 \text{ m}_n^3 \text{ (plyn) / kg}_{(pal)}$$

- Výtěžek dehtu:

$$c_{dehet} = c_{dehet_v_suchém_stavu} \cdot Y = \frac{878,85}{1000} \cdot 3,36 = 2,95 \text{ g/kg}$$

7.6 Účinnosti

Účinnost zplyňování se obvykle pohybuje v rozmezí 70-90 %. Vypočítá se podle vzorce:

$$\eta = \frac{\dot{V}_{plyn} \cdot Q_{i,plyn}^r}{\dot{m}_{palivo} \cdot Q_{i,palivo}^r}$$

Hmotnostní bilancí byl určen hmotnostní tok plynu. Naměřené množství vzduchu bylo přepočítáno pomocí stavové rovnice na hmotnostní tok za normálních podmínek ($T=20^\circ\text{C}$, $p=101,325 \text{ kPa}$). Z něj byl zjištěn i objem kyslíku, který byl do reaktoru vháněn. Experimentální množství přiváděného vzduchu bylo konstantní a obohacené o 4 % kyslíku. Množství paliva bylo již stanoveno z podávací zkoušky. Hodnota uhlíku v odcházejícím popelu se pohybuje v rozmezí 5-10 % z prchavé složky paliva. V tomto případě bylo počítáno s procentuální hodnotou 5 %. U výstupních parametrů této bilance se zanedbává odcházející pára vzniklá vypařením ve vstupujícím \dot{m}_{pal} a \dot{m}_{H_2O} . Hodnotou \dot{m}_{plyn} se rozumí hmotnostní tok suchého plynu.

$$\dot{m}_{pal} + \dot{m}_{media} = \dot{m}_{plyn} + \dot{m}_{uhlík}$$

$$\dot{m}_{plyn} = \dot{m}_{pal} + \dot{m}_{media} - \dot{m}_{uhlík}$$

Hmotnostní tok plynu byl dále přepočítán na objemový tok pomocí součtu hustot a procentuálních podílů složek jednotlivých vzorků paliva.

Tabulka 16 Hustota jednotlivých složek plynu

Složka plynu	ρ [kg/m ³]
H ₂	0,089
CO	1,25
CO ₂	1,97
N ₂	1,25
CH ₄	0,72
O ₂	1,4

Tabulka 17 Hmotnostní bilance

Vz. pl.	\dot{m}_{H_2O} [kg/h]	\dot{V}_{vzd} [m ³ /h]	\dot{m}_{vzd} [kg/h]	\dot{V}_{O_2} [m ³ /h]	\dot{m}_{O_2} [kg/h]	\dot{m}_{pal} [kg/h]	$\dot{m}_{daf,pal}$ [kg/h]	$\dot{m}_{uhlík}$ [kg/h]	\dot{m}_{plyn} [kg/h]	ρ [kg/m ³]	\dot{V}_{plyn} [m ³ /h]
1	12	23,12	27,75	0,925	1,323	10,21	7,96	0,40	50,88	1,27	40,21
2	12	23,12	27,75	0,925	1,323	9,98	7,78	0,39	50,66	1,27	39,93
3	12	23,12	27,75	0,925	1,323	10,07	7,85	0,39	50,75	1,27	39,82
4	12	23,12	27,75	0,925	1,323	11,11	8,66	0,43	51,75	1,26	40,93
5	12	23,12	27,75	0,925	1,323	11,11	8,66	0,43	51,75	1,28	40,54
6	8	23,07	27,68	0,923	1,320	13,38	10,43	0,52	49,86	1,23	40,60
7	8	23,07	27,68	0,923	1,320	12,46	9,71	0,49	48,98	1,22	39,98
8	8	23,07	27,68	0,923	1,320	12,62	9,84	0,49	49,13	1,22	40,19
9	4	23,08	27,69	0,923	1,320	12,99	10,13	0,51	45,50	1,23	36,99
10	4	23,08	27,69	0,923	1,320	12,78	9,96	0,50	45,29	1,23	36,87
11	4	23,08	27,69	0,923	1,320	12,62	9,84	0,49	45,14	1,22	37,01
13	8	23,05	27,66	0,922	1,318	14,85	11,58	0,58	51,25	1,22	42,16
15	0	23,10	27,72	0,924	1,321	13,05	10,17	0,51	41,58	1,26	33,00
16	0	23,10	27,72	0,924	1,321	13,05	10,17	0,51	41,58	1,25	33,35
17	0	23,10	27,72	0,924	1,321	13,05	10,17	0,51	41,58	1,26	32,97

Příklad výpočtu pro 1. vzorek plynu:

- Přepočítání objemového toku vzduchu na objemový tok za normálních podmínek (T=20 °C, p=101,325 kPa):

$$\frac{p_1 \cdot \dot{V}_1}{T_1} = \frac{p_n \cdot \dot{V}_n}{T_n} \rightarrow \dot{V}_n = \frac{p_1 \cdot \dot{V}_1 \cdot T_n}{T_1 \cdot p_n}$$

$$p_1 = p_n + p_{př,vzd}$$

$$\dot{V}_n = \dot{V}_{vzd} = \frac{(101325 + 40000) \cdot 19 \cdot 20}{62,8 \cdot 101325} = 23,12 \text{ m}_n^3/\text{h}$$

- Výpočet hmotnostního toku vzduchu za normálních podmínek:

$$\rho = 1,2 \text{ m}_n^3/\text{kg}$$

$$\dot{m}_{vzd} = \rho \cdot \dot{V}_{vzd} = 1,2 \cdot 23,12 = 27,75 \text{ kg/h}$$

- Množství kyslíku (O₂→4%, ρ=1,43):

$$\dot{V}_{O_2} = \frac{4 \cdot \dot{V}_{vzd}}{100} = \frac{4 \cdot 23,12}{100} = 0,925 \text{ m}_n^3/\text{h}$$

$$\dot{m}_{O_2} = \rho \cdot \dot{V}_{O_2} = 1,43 \cdot 0,925 = 1,323 \text{ kg/h}$$

- Množství uhlíku (5 % z podílu prchavé hořlaviny biomasy, $h^{daf}=77,95$ %):

$$\dot{m}_{daf,pal} = \frac{77,95 \cdot \dot{m}_{pal}}{100} = 7,96 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{uhlík} = \frac{5 \cdot \dot{m}_{daf,pal}}{100} = 0,40 \text{ kg/h}$$

- Hmotnostní bilance:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{media} &= \dot{m}_{O_2} + \dot{m}_{H_2O} \\ \dot{m}_{plyn} &= \dot{m}_{vzduch} + \dot{m}_{palivo} + \dot{m}_{media} - \dot{m}_{uhlík} \\ &= 27,75 + 10,21 + (1,323 + 12) - 0,40 = 50,88 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

- Přepočítání hmotnostního toku plynu na objemový tok:

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_{H_2} \cdot H_2 + \rho_{CO} \cdot CO + \rho_{CO_2} \cdot CO_2 + \rho_{N_2} \cdot N_2 + \rho_{O_2} \cdot O_2 + \rho_{CH_4} \cdot CH_4 \\ \rho &= \frac{0,089 \cdot 9,214 + 1,25 \cdot 7,801 + 1,97 \cdot 21,499 + 1,25 \cdot 56,725 + 0,72 \cdot 3,629 + 1,4 \cdot 0,075}{100} \\ &= 1,27 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

$$\dot{V}_{plyn} = \frac{\dot{m}_{plyn}}{\rho} = \frac{50,88}{1,27} = 40,21 \text{ m}^3/\text{h}$$

Tabulka 18 Výpočet výtěžku plynu a účinnosti

Vzorek plynu	\dot{V}_{plyn} [m_n^3/h]	\dot{m}_{pal} [kg/h]	Y [m_n^3 (plyn)/kg(pal)]	$Q_{i,plyn}^r$ [MJ/mn3]	$Q_{i,pal}^r$ [MJ/kg]	η [%]
1	40,21	10,21	3,94	3,48	16,3	84,10
2	39,93	9,98	4,00	3,26	16,3	80,09
3	39,82	10,07	3,95	3,14	16,3	76,16
4	40,93	11,11	3,68	3,33	16,3	75,26
5	40,54	11,11	3,65	3,09	16,3	69,30
6	40,60	13,38	3,03	3,94	16,3	73,49
7	39,98	12,46	3,21	3,91	16,3	77,06
8	40,19	12,62	3,18	3,98	16,3	77,78
9	36,99	12,99	2,85	3,50	16,3	61,23
10	36,87	12,78	2,88	3,74	16,3	66,18
11	37,01	12,62	2,93	3,42	16,3	61,58
13	42,16	14,85	2,84	4,03	16,3	70,27
15	33,00	13,05	2,53	3,40	16,3	52,72
16	33,35	13,05	2,56	3,41	16,3	53,46
17	32,97	13,05	2,53	3,29	16,3	51,07

Příklad výpočtu účinnosti pro 1. vzorek plynu:

$$\eta = \frac{\dot{V}_{plyn} \cdot Q_{i,plyn}^r}{\dot{m}_{palivo} \cdot Q_{i,palivo}^r} = Y \cdot \frac{Q_{i,plyn}^r}{Q_{i,palivo}^r}$$

- Výhřevnost plynu je vypočítána podle procentuálního podílu složek a jejich jednotlivých výhřevností podle tabulek:

$$Q_{i,plyn}^r = \frac{10,22 \cdot H_2 + 55,96 \cdot C_2H_4 + 60,43 \cdot C_2H_6 + 33,948 \cdot CH_4 + 11,96 \cdot CO}{100}$$

$$Q_{i,plyn}^r = \frac{10,22 \cdot 9,214 + 55,96 \cdot 0,607 + 60,43 \cdot 0,054 + 33,948 \cdot 3,629 + 11,96 \cdot 7,801}{100}$$

$$= 3,48 \text{ MJ}/m_n^3$$

- Výhřevnost paliva je vypočítána z laboratorně změřeného spalného tepla ($Q_s=17,8 \text{ MJ/kg}$):

$$Q_{i,pal}^r = Q_s - r \cdot (W^r + 8,94 \cdot H_2)$$

$$Q_{i,pal}^r = 17,8 - 2,454 \cdot (0,1273 + 8,94 \cdot 0,0547) = 16,3 \text{ MJ}/kg$$

- Výtěžek plynu Y:

$$Y = \frac{\dot{V}_{plyn}}{\dot{m}_{palivo}} = \frac{40,21}{10,21} = 3,94 \text{ m}_n^3 \text{ (plyn)}/kg \text{ (pal)}$$

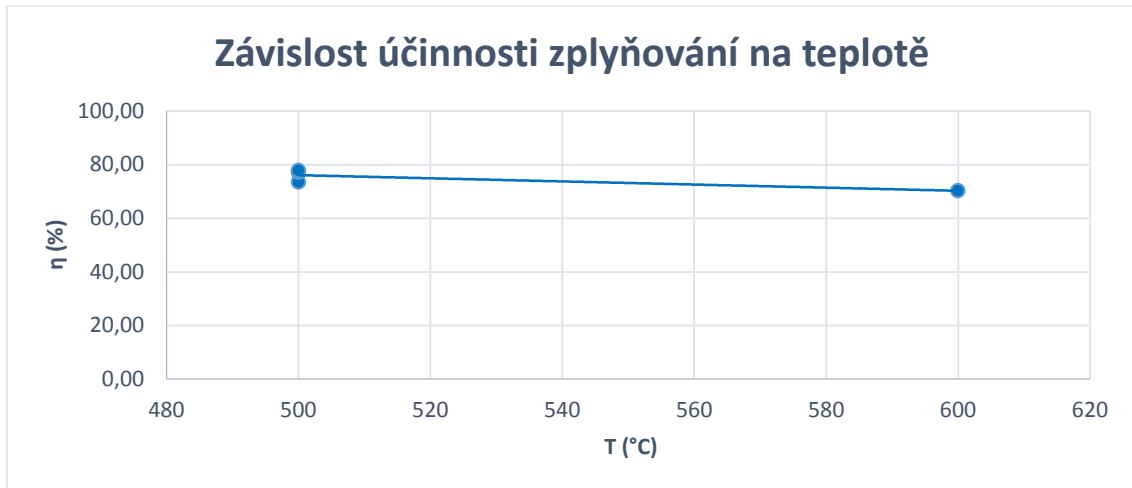
- Účinnost zplyňování:

$$\eta = Y \cdot \frac{Q_{i,plyn}^r}{Q_{i,palivo}^r} \cdot 100 = 3,94 \cdot \frac{3,48}{16,3} \cdot 100 = 84,10 \%$$

Účinnost zplyňování byla určena pouze ze vzorků plynu off-line odběrem. Grafy zobrazují její závislost na množství přiváděné vodní páry do reaktoru a na teplotě. Z prvního grafu jasně vyplývá, že účinnost stoupá společně s rostoucím množstvím vodní páry. Co se týče vlivu teploty, tak účinnost dle vypočítaných hodnot klesá s rostoucí teplotou. Takové vyvození závěru ovšem vyžaduje lepší proměření.

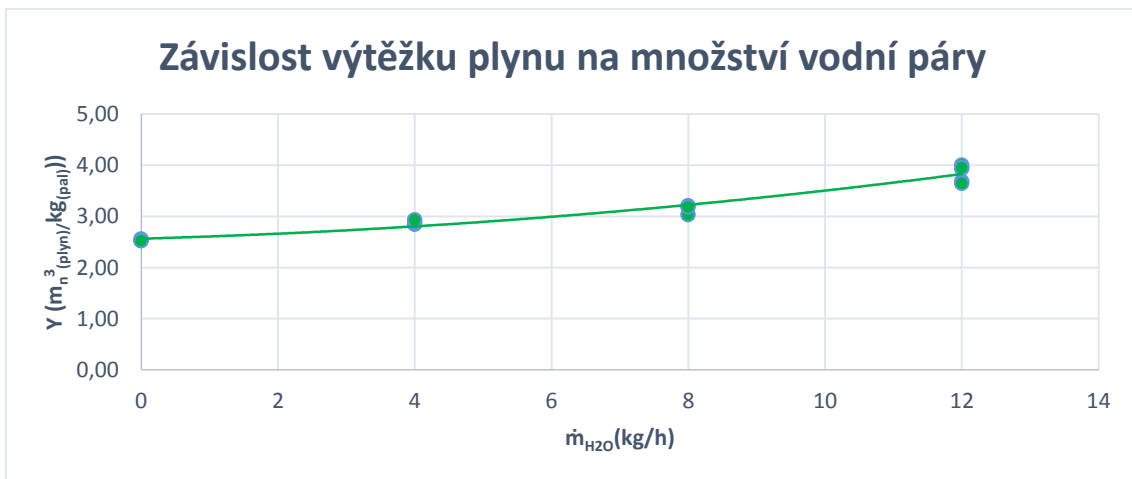


Obrázek 31 Graf závislosti účinnosti zplyňování na množství vodní páry

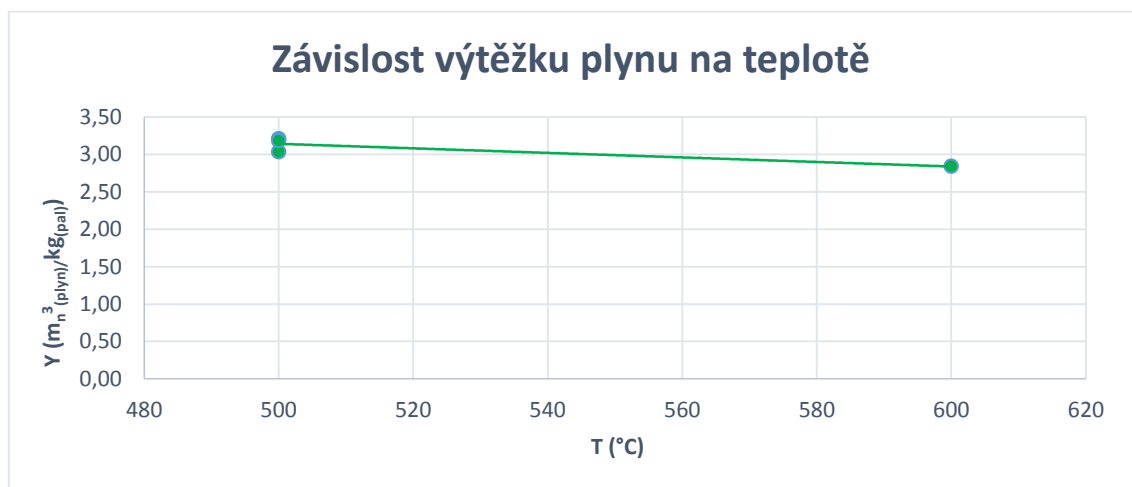


Obrázek 32 Závislost účinnosti zplyňování na výstupní teplotě plynu

V grafech jsou zobrazeny závislosti výtěžku plynu Y na vodní páře a na teplotě. Je zřejmé, že s přidavkem množství vodní páry výtěžek roste. Ovšem po vynesení do grafu pro vliv teploty lze vidět, že s rostoucí teplotou výtěžnost naopak klesá.



Obrázek 33 Graf závislosti výtěžku plynu na množství vodní páry



Obrázek 34 Závislost výtěžku plynu na teplotě

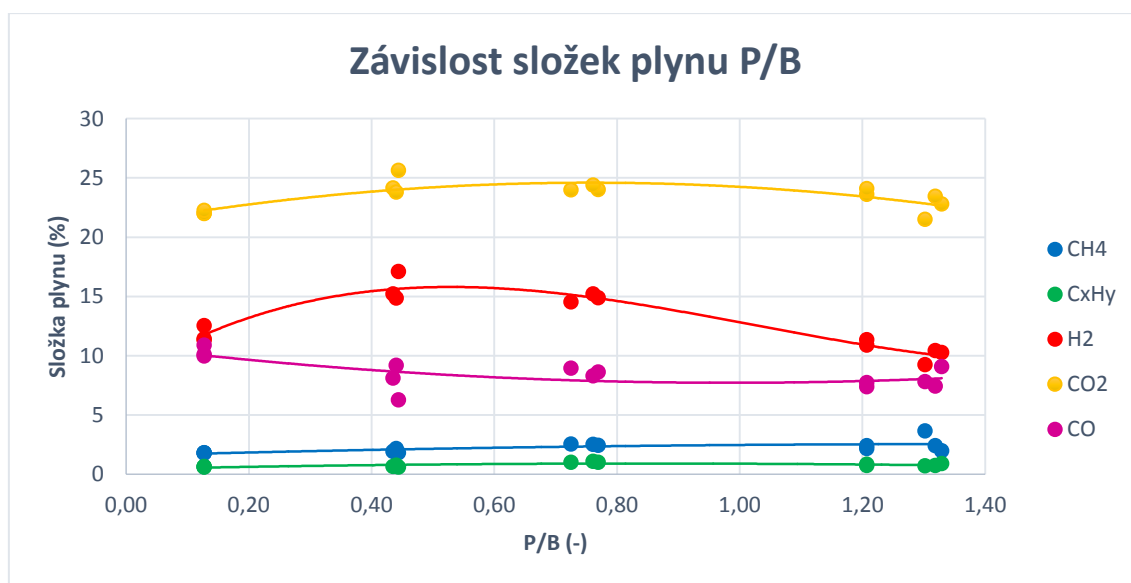
7.7 Poměr pára/biomasa (steam to biomass)

Poměry pára/biomasa pro jednotlivé vzorky plynu jsou již stanoveny v kapitole 7.3. Zde jsou zobrazeny vlivy těchto poměrů na off-line veličinách, tzn. Složení plynu, obsah dehtu, výhřevnost a účinnost. U tohoto poměrového parametru je zahrnuta vlhkost paliva.

Tabulka 19 Hodnoty veličin pro porovnání s P/B

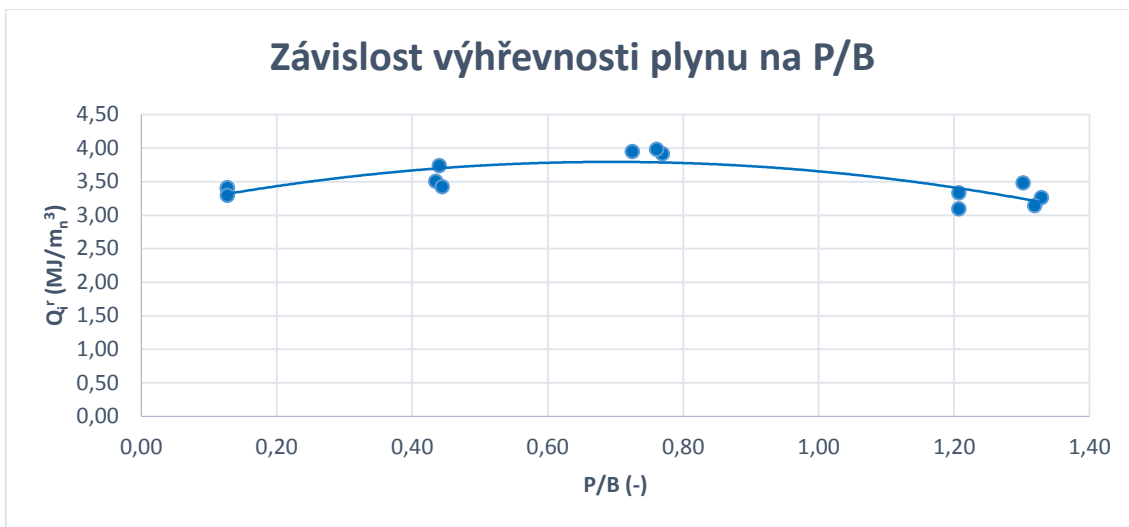
Vz. pl.	čas	\dot{m}_{H_2O} [kg/h]	T [°C]	P/B [-]	H ₂ [%]	CO ₂ [%]	C _x H _y [%]	CH ₄ [%]	CO [%]	LHV [MJ/m _n ³]	η [%]
1	11:00	12	500	1,30	9,214	21,499	0,687	3,629	7,801	3,48	84,10
2	11:15	12	500	1,33	10,237	22,781	0,867	1,964	9,069	3,26	80,09
3	11:24	12	500	1,32	10,403	23,444	0,697	2,383	7,42	3,14	76,16
4	12:00	12	500	1,21	11,335	23,605	0,808	2,386	7,711	3,33	75,26
5	12:15	12	500	1,21	10,861	24,073	0,703	2,143	7,347	3,09	69,30
6	12:45	8	500	0,73	14,529	23,975	0,979	2,518	8,93	3,94	73,49
7	13:05	8	500	0,77	14,871	24,003	0,981	2,421	8,611	3,91	77,06
8	13:20	8	500	0,76	15,199	24,366	1,07	2,493	8,269	3,98	77,78
9	14:20	4	500	0,44	15,178	24,148	0,626	1,886	8,08	3,50	61,23
10	14:30	4	500	0,44	14,85	23,779	0,73	2,138	9,164	3,74	66,18
11	14:50	4	500	0,44	17,094	25,632	0,563	1,793	6,259	3,42	61,58
15	17:37	0	400	0,13	11,31	21,986	0,623	1,775	10,865	3,40	52,72
16	17:47	0	400	0,13	12,509	21,999	0,582	1,772	10,085	3,41	53,46
17	17:50	0	400	0,13	11,417	22,248	0,587	1,802	9,936	3,29	51,07

Ze závislosti složek vzorků plynu na poměru P/B lze vidět, že nejnižší zastoupení mají opět uhlovodíky, včetně metanu, které jsou téměř konstantní oproti ostatním znázorněným složkám. Podle průběhu oxid uhelnatý pozvolna klesá k hodnotě poměru 1, a poté mírně stoupá. Podíl vodíku se nejprve zvyšuje až k asi 0,55, a následně strměji klesá. Maximum oxidu uhličitého je zřejmě ze závislosti u poměru okolo 0,75.



Obrázek 35 Graf závislosti vybraných složek plynu na P/B

Z grafu popisující závislost výhřevnosti na poměr P/B lze vyvodit nejvyšší výhřevnost vyrobeného plynu procesem zplyňování. Z proložení funkce se zdá být nejvyšší hodnota výhřevnosti při P/B=0,7.



Obrázek 36 Graf závislosti výhřevnosti plynu na poměru P/B

V následujícím grafu je vynesena závislost účinnosti zplyňování na poměru P/B. Je zřejmé, že se zvyšujícím se poměrem P/B efektivita procesu zplyňování roste.



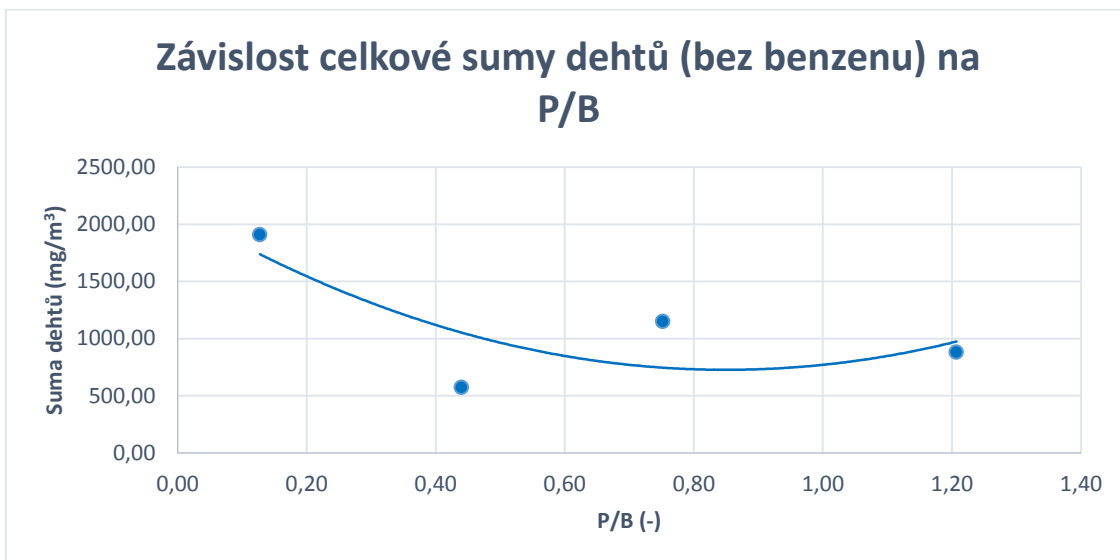
Obrázek 37 Graf závislosti účinnosti zplyňování na poměru P/B

Pro určení vlivu poměru P/B na sumy dehtu byly tyto hodnoty poměru podle přívodu vodní páry při odbírání vzorků dehtu aritmeticky zprůměrovány.

Tabulka 20 Průměrné hodnoty poměru P/B podle odběrů dehtu

Vzorek dehtu	\dot{m}_{H_2O} [kg/h]	T [°C]	Suma dehtů [mg/m ³]	P/B [-]
1	12	500	878,85	1,21
2	8	500	1149,83	0,75
3	4	500	573,34	0,44
4	0	400	1908,52	0,13

Z vytvořené závislosti celkové sumy dehtu (bez benzenu) na poměru P/B jednoznačně nevyplývá jeho vliv. Největší obsah dehtu podle grafu je P/B=0,13. Ovšem vliv tohoto poměru na množství dehtu v plynu se nezdá být relevantní. Příčinou takového výsledku může být již zmiňovaná nižší teplota reaktoru v průběhu odebrání 4. vzorku dehtu právě při P/B=0,13.



Obrázek 38 Graf závislosti celkové sumy dehtů (bez benzenu) na P/B

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo popsat fluidní zplyňování biomasy a používaná zařízení, možná zplyňovací média a jejich vlivy na proces a výstupy zplyňování. Dále měly být navrženy experimenty zplyňování dřevní biomasy se vzduchem, kyslíkem a přidavkem vodní páry. Následně mělo být provedeno experimentální měření a jeho vyhodnocení.

V první části se práce zabývala rešerší biomasy a jejímu možnému zpracování. Poté byl podrobněji popsán termochemický proces zplyňování a typy zplyňovacích reaktorů. Dále byl popsán výchozí produkt zplyňování, tedy plyn, jeho složení a obsah nečistot, včetně jejich eliminace.

Na průběh zplyňování a jeho výstup má vliv zvolené zplyňovací médium. Patří sem nejčastěji používaný vzduch, dále kyslík O_2 , vodní pára H_2O , oxid uhličitý CO_2 a jejich kombinace. Zásadní pro tuto práci bylo obohacení vzduchu o kyslík (4 %) s regulovaným množstvím hmotnostního toku vodní páry.

Další část byla věnována návrhům experimentů zplyňování dřevní biomasy, v tomto případě se jednalo o smrkovou štěpku. Jak již bylo řečeno, klíčová byla regulace hmotnostního toku vodní páry, která byla vháněna do reaktoru. Mimo vstupujícího množství H_2O měly být navrženy i výstupní teploty a zkoumán jejich vliv.

Na základě návrhů experimentálních podmínek zplyňování byly provedeny experimenty na fluidním zařízení Biofluid 100 nacházející se na Energetickém ústavu VUT v Brně. Bylo zaznamenáváno procentuální složení plynu on-line analyzátozem a byly odebrány off-line vzorky plynu do vzorkovnic a vzorky dehtu podle Tar protocolu.

Po provedení experimentu a zanalyzování vzorků byly tyto hodnoty zpracovány a vyhodnoceny. Zkoumal se vliv navržených přidavků vodní páry a výstupních teplot na složení vyrobeného plynu, obsahu dehtu a na další důležité parametry, jako například výhřevnost a účinnost.

Měření proběhlo v 5 režimech, kdy byl regulován hmotnostní tok vodní páry nebo teplota výstupního plynu. Při nulovém průtoku H_2O byla výstupní teplota $400\text{ }^\circ\text{C}$. Tato nižší teplota má zanedbatelný vliv, a proto se započítává jako rovnocenná s ostatními přidavky vodní páry při teplotě $500\text{ }^\circ\text{C}$.

- 1) $\dot{m}_{H_2O}=12\text{ kg/h}$, $T_{\text{výstup}}=500\text{ }^\circ\text{C}$
- 2) $\dot{m}_{H_2O}=8\text{ kg/h}$, $T_{\text{výstup}}=500\text{ }^\circ\text{C}$
- 3) $\dot{m}_{H_2O}=4\text{ kg/h}$, $T_{\text{výstup}}=500\text{ }^\circ\text{C}$
- 4) $\dot{m}_{H_2O}=8\text{ kg/h}$, $T_{\text{výstup}}=600\text{ }^\circ\text{C}$
- 5) $\dot{m}_{H_2O}=0\text{ kg/h}$, $T_{\text{výstup}}=400\text{ }^\circ\text{C}$

Z odebraného vzorku paliva bylo laboratorně stanoveno jeho spalné teplo a vlhkost ($Q_s=17,8\text{ MJ/kg}$, $W^f=12,73\text{ }%$). Množství paliva přiváděného šnekovým dopravníkem do reaktoru bylo vypočítáno z hodnot podávací zkoušky.

Složení plynu bylo stanoveno pomocí on-line analyzátoru a off-line metodou. Bylo odebráno celkem 17 vzorků plynu, z nichž vzorky č. 12 a 14 byly špatně odebrané, tudíž

se s nimi dále nepočítalo. Off-line metoda je v tomto případě přesnější, a proto se jí příkládá větší váha.

Výchozí plyn je tvořen při takovém zplyňování přibližně z 50 % dusíkem, naopak nejnižší procentuální složkou je kyslík. Přídavek vodní páry na uhlovodíky, včetně metanu, má podle měření minimální vliv. Nejvyšší podíly vodíku a oxidu uhelnatého byly zaznamenány při 4 a 8 kg/h průtoku H_2O . Pro lepší vyhodnocení by bylo třeba hodnoty proměřit při průtoku 6 kg/h. Oxid uhelnatý s rostoucím přidavkem vodní páry mírně klesá. Podobné průběhy lze vidět i na grafu závislosti složek plynu na poměru P/B, u kterého je zahrnuta i vlhkost paliva. Nejvíce se odlišuje vodíkem, jehož maximum lze považovat při P/B=0,5.

Hmotnostní průtok vodní páry na výhřevnost plynu neměl výrazný vliv. Ta se pohybovala v rozmezí 3–4 MJ/m_n³. Nicméně její nejvyšší hodnota byla zaznamenána při 8 kg/h vodní páry. V případě poměru P/B lze přisuzovat maximální výhřevnost hodnotě 0,7.

Účinnost vykazovala nárůst s rostoucím přidavkem H_2O , stejně tak výtěžek plynu a poměr P/B. Při 12 kg/h vodní páry a P/B=1,3 dosahoval proces zplyňování účinnosti až 84,1 %.

Výsledky vlivu teploty na proces zplyňování nelze s úplnou přesností vyvodit kvůli malému počtu odebraných vzorků plynu a měření jen při dvou výstupních teplotách. Proměřovány byly teploty 500 °C a 600 °C při konstantním průtoku 8 kg/h přidavku vodní páry. Z dostupných experimentálních dat vyplývá, že výstupní teplota nemá na složky uhlovodíků, včetně metanu, a oxidu uhelnatého velký vliv. Podíl vodíku a oxidu uhličitého s rostoucí teplotou mírně stoupají.

Co se týče výhřevnosti plynu, tak s narůstající teplotou opět stoupá. Při výstupní teplotě 600 °C byla její nejvyšší hodnota 4,03 MJ/m_n³. Naopak účinnost zplyňování podle naměřených hodnot s větší teplotou klesá.

Obsah dehtu byl laboratorně stanoven z odebraných vzorků. Byly odebrány 4 vzorky dehtu při změnách průtoku vodní páry. Jednotlivé složky dehtu byly rozděleny do tříd dle Tar protocolu. Největší podíly složek dehtu byly zastoupeny 3. a 4. třídou, 1. a 5. třída byly oproti nim zanedbatelné. Jednoznačná závislost obsahu dehtu na přívodu vodní páry se nepotvrdila. Výsledky ovšem mohly být zkresleny menší provozní teplotou reaktoru v určitém časovém rozmezí při odběru 4. vzorku dehtu.

Pro přesnější vyhodnocení by bylo potřeba důkladnější proměření. Pro experimentální podmínky $\dot{m}_{H_2O}=8$ kg/h, $T_{výstup}=600$ °C byl použitelný pouze jeden vzorek plynu. Navíc regulované teploty pro 8 kg/h vodní páry byly jen dvě, a sice 500 °C a 600 °C. Tyto příčiny omezily hodnocení vlivu teploty. Při odběru 4. vzorku dehtu byla v určitém časovém rozmezí menší teplota reaktoru. To mohlo mít vliv na obsah dehtu, a tedy i na konečné hodnocení.

Řešením pro podrobnější vyhodnocení vlivů přidavku vodní páry a výstupních teplot by bylo důkladnější proměření. Tím je myšleno postupné nahrazování vzduchu vodní parou jako zplyňovacího média a více regulovaných výstupních teplot s větším počtem odebraných vzorků plynu pro objektivnější zhodnocení. Dále by bylo žádoucí

proměření pro přesnější výpočet hmotnostní bilance, u které se zanedbává množství vystupující páry z paliva a přidavku zplyňovacího činidla.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Air–steam gasification of biomass in a fluidised bed: Process optimisation by enriched air. *Fuel processing technology* [online]. 2009, **90**(5), 677–685 [cit. 2019-05-22]. ISSN 0378-3820. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.12.007>
- [2] BALÁŠ, M. Čištění energoplynu kovovými katalyzátory. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 133 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
- [3] BALÁŠ, Marek. *KOTLE A VÝMĚNÍKY TEPLA*. 2. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7. Právní a etické
- [4] Biomasa - využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR. *OEnergetice* [online]. Třebíč: David Vobořil, [2017], 2017 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/biomasa-vyuziti-zpracovani-vyhody-a-nevyhody>
- [5] Čpavek budoucím palivem?. *TRÍPÓL* [online]. Tábor: Simopt, 2013 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.3pol.cz/cz/rubriky/bez-zarazeni/243-cpavek-budoucim-palivem>
- [6] Effects of operating conditions and reactor structure on biomass entrained-flow gasification. *Renewable Energy* [online]. 2019, **139**, 781-795 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://doi-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/10.1016/j.renene.2019.02.113>
- [7] ELBL, P. Optimalizace podmínek zplyňování biologicky rozložitelných odpadů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 69 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Lisý, Ph.D.
- [8] *Energie z biomasy ...: sborník příspěvků ze semináře* [online]. V Brně: Vysoké učení technické, 2003 [cit. 2019-05-22]. ISBN 978-80-214-3542-1. Dostupné z: <http://www.eu.fme.vutbr.cz/odbor-energetickeho-inzenyrstvi/energie-z-biomasy-vii-rok-2007>
- [9] HNILIČKOVÁ, V. Zplyňování drcených dřevotřísek. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 57 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Lisý, Ph.D..
- [10] Hydrogen production from biomass gasification; a theoretical comparison of using different gasification agents. *Energy Conversion and Management* [online]. 2018, **159**, 30-411 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.096>
- [11] KAŠPAR, M. Zplyňování biomasy a odpadů s kogenerací pomocí mikroturbíny. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 117 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marek Baláš.
- [12] KLASS, Donald L. Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals. Academic Press, 1998, London, UK, 651 str., ISBN 0-12-410950-0
- [13] KNOEF, H. A. M. Handbook biomass gasification. BTG biomass technology group, Enschede, 2005. ISBN 90-810068-1-9
- [14] LISÝ, M. Čištění energoplynu z biomasy v katalytickém vysokoteplotním filtru. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 148 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.

- [15] MODERNÍ VYUŽITÍ BIOMASY TECHNOLOGICKÉ A LOGISTICKÉ MOŽNOSTI [online]. Česká energetická agentura, 2006 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: www.mpo-efekt.cz/dokument/02.pdf
- [16] MOSKALÍK, J. Návrh metod čištění plynu při zplyňování stébelnin. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 118 s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Jan Fiedler, Dr..
- [17] Přístrojové vybavení. *ENERGETICKÝ ÚSTAV* [online]. Brno: FSI VUT v Brně, 2019 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <http://www.eu.fme.vutbr.cz/odbor-energetického-inzenyrstvi/pristrojove-vybaveni>
- [18] Salami, N. Zplyňování borové dřevní štěpky s parovzduchovou směsí ve fluidním loži .Brno: Vysoké ucení technické v Brne, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 120 s. Vedoucí disertacní práce doc. Ing. Zdeněk Skála, Csc
- [19] VAVŘÍKOVÁ, P. Návrh čištění energoplynu mokrou metodou. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 86 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.
- [20] VYPUŠŤÁKOVÁ, V. Ekologické dopady vytápění. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 41 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marek Baláš, Ph.D.
- [21] Zplyňování – principy a reaktory. *Tzbinfo* [online]. Ostrava: Ing. Václav Peer, Ing. Pavel Friedel, 2016 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzbinfo.cz/vytapime-tuhymi-palivy/13729-zplynovani-principy-a-reaktory>
- [22] Zplyňování biomasy – možnosti uplatnění. *CZ Biom* [online]. Praha: Michael Pohořelý, 2018 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/zplynovani-biomasy-moznosti-uplatneni>
- [23] Zplyňování biomasy. *Team ENERGO s.r.o.* [online]. Brno: Team ENERGO, [2016] [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: http://www.tenergoteam.cz/?page_id=159

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
A^r	Popelovina	%
<i>BTEX</i>	Benzen, toluene, ethylbenzene, xylen	-
c	Výtěžek dehtu	$m^3_{n,(plyn)}/kg_{(pal)}$
C	Uhlík	-
$C_6H_{12}O_6$	Glukóza	-
CH_4	Metan	-
CO	Oxid uhelnatý	-
CO_2	Oxid uhličitý	-
COS	Karbonylsulfid	-
CS_2	Sirouhlík	-
C_xH_y	Uhlovodík	-
<i>ER</i>	Zplyňovací poměr	-
f	Frekvence	Hz
<i>FSI</i>	Fakulta strojního inženýrství	-
h	Hořlavina	%
H, H_2	Vodík	-
H_2O	Vodní pára	-
H_2S	Sirovodík	-
HCl	Chlorovodík	-
<i>LHV</i>	Lower heating value	MJ/m_n^3
\dot{m}	Hmotnostní tok	kg/h
N, N_2	Dusík	-
NH_3	Amoniak	-
NO_x	Oxidy dusíku	-
O, O_2	Kyslík	-
p	Tlak	Pa
<i>P/B</i>	Poměr pára/biomasa (steam to biomass)	-
<i>PCDD</i>	Polychlor-dibenzo-dioxin	-
<i>PCDF</i>	Pentachlor-dibenzofuran	-
Q_i^r	Výhřevnost	$MJ/kg, MJ/m_n^3$
Q_s	Spalné teplo	$MJ/kg, MJ/m_n^3$
r	Výparné teplo	kJ/kg
S	Síra	-
SO_x	Oxidy síry	-
T	Teplota	°C
t	Čas	s, hod
\dot{V}	Objemový tok	m_n^3/h
<i>VUT</i>	Vysoké učení technické	-

W	Vlhkost	%
Y	Výtěžek plynu	m_n^3/kg
ΔH	Reakční teplo	kJ/mol
ΔT	Diference teplot	$^{\circ}C$
η	Účinnost	%
ρ	Hustota	kg/m^3

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Rozdělení biomasy ^[4]	12
Obrázek 2 Přehled technologických zpracování biomasy ^[11]	14
Obrázek 3 Schéma Autotermního a alotermního zplyňování ^[8]	16
Obrázek 4 Orientační výkon zplyňovacích reaktorů ^[19]	20
Obrázek 5 Schéma a) protiproudého, b) souprroudého, c) křížového reaktoru s pevným ložem ^[21]	21
Obrázek 6 Schéma fluidního reaktoru ^[21]	22
Obrázek 7 Rozdělení dehtu ^[19]	25
Obrázek 8 Možnosti využití plynu ze zplyňování ^[11]	29
Obrázek 9 Závislost složení plynu na poměru ER ^[18]	32
Obrázek 10 Biofluid 100	35
Obrázek 11 Schéma Biofluid 100 ^[7]	35
Obrázek 12 On-line analyzátor plynu ^[17]	37
Obrázek 13 Ukázka vzorkovnic (myši) naplněných vodou	38
Obrázek 14 Schéma zjednodušené odběrové trati pro dehet ^[7]	40
Obrázek 15 Promývačky před odběrem dehtu	40
Obrázek 16 Promývačky po odběru dehtu	40
Obrázek 17 Průběh teplot při měření	41
Obrázek 18 Průběh tlaků při měření	42
Obrázek 19 Graf závislosti hmotnostního toku paliva na frekvenci šnekového dopravníku	44
Obrázek 20 Graf závislosti složek jednotlivých plynů z off-line analýzy na hmotnostním průtoku vodní páry	47
Obrázek 21 Graf závislosti složek jednotlivých plynů z on-line analýzy na hmotnostním průtoku vodní páry	48
Obrázek 22 Graf závislosti výhřevnosti plynu na množství vodní páry (off-line)	48
Obrázek 23 Graf závislosti výhřevnosti plynu na množství vodní páry (on-line)	49
Obrázek 24 Závislost obsahu složek plynu na výstupní teplotě (off-line)	50
Obrázek 25 Závislost obsahu složek plynu na výstupní teplotě (on-line)	50
Obrázek 26 Závislost výhřevnosti plynu LHV na výstupní teplotě (off-line)	51
Obrázek 27 Závislost výhřevnosti plynu LHV na výstupní teplotě (on-line)	51
Obrázek 28 Odebrané vzorky dehtu	52
Obrázek 29 Suma dehtů jednotlivých tříd ve vzorcích podle Tar protocolu	54
Obrázek 30 Závislost sumy dehtů podle Tar protocolu (bez benzenu) na hmotnostním průtoku vodní páry	54
Obrázek 31 Graf závislosti účinnosti zplyňování na množství vodní páry	58
Obrázek 32 Závislost účinnosti zplyňování na výstupní teplotě plynu	59
Obrázek 33 Graf závislosti výtěžku plynu na množství vodní páry	59
Obrázek 34 Závislost výtěžku plynu na teplotě	59
Obrázek 35 Graf závislosti vybraných složek plynu na P/B	60
Obrázek 36 Graf závislosti výhřevnosti plynu na poměru P/B	61
Obrázek 37 Graf závislosti účinnosti zplyňování na poměru P/B	61
Obrázek 38 Graf závislosti celkové sumy dehtů (bez benzenu) na P/B	62

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Prvkový rozbor biomasy ^[11]	13
Tabulka 2 Výhody a nevýhody zplyňování oproti spalování ^[22]	15
Tabulka 3 Procentuální podíl složek plynu po zplyňování médii ^[8]	31
Tabulka 4 Experimentální podmínky z odborné literatury ^[1]	33
Tabulka 5 Složky plynu v závislosti na poměru P/B ^[18]	34
Tabulka 6 Klasifikace dehtů podle tříd ^[2]	39
Tabulka 7 Parametry přiváděného vzduchu do reaktoru při režimech měření	42
Tabulka 8 Prvkový rozbor smrkové štěpky	43
Tabulka 9 Hodnoty naměřené při podávací zkoušce	44
Tabulka 10 Výpočet hmotnostního toku paliva a poměru P/B	44
Tabulka 11 Složky plynu off-line	45
Tabulka 12 Složení plynu on-line	46
Tabulka 13 Tabulka podmínek odběrů dehtů.....	52
Tabulka 14 Složky jednotlivých odběrů dehtů rozdělených do tříd podle Tar protocolu	53
Tabulka 15 Výtěžek dehtu	55
Tabulka 16 Hustota jednotlivých složek plynu	56
Tabulka 17 Hmotnostní bilance	Chyba! Záložka není definována.
Tabulka 18 Výpočet výtěžku plynu a účinnosti	57
Tabulka 19 Hodnoty veličin pro porovnání s P/B.....	60
Tabulka 20 Průměrné hodnoty poměru P/B podle odběrů dehtu	61