



**FAKULTA
ŠTROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav energetiky

**Charakteristika spalování dřevní a nedřevní
biomasy v bublinkové fluidní vrstvě**

**Characteristics of combustion of woody and
non woody biomass in a bubbling fluidized
bed**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2022

Klára OSIČKOVÁ

Studijní program: NEPI; ENERGETIKA A PROCESNÍ INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor / specializace: NO71TENE / ENERGETIKA

Vedoucí práce: Ing. Pavel Skopec, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Oslíčková** Jméno: **Klára** Osobní číslo: **475070**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Energetika a procesní inženýrství**
Specializace: **Energetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Charakteristika spalování dřevní a nedřevní biomasy v bublinkové fluidní vrstvě

Název diplomové práce anglicky:

Characteristics of combustion of woody and non woody biomass in a bubbling fluidized bed

Pokyny pro vypracování:

Práce bude obsahovat tyto body:

- 1) literární rešerši zaměřenou na specifika spalování dřevní i nedřevní biomasy ve fluidní vrstvě, s důrazem na charakteristiku vzniku plynných znečišťujících látek,
- 2) vytvoření experimentálního schématu spalování vybraných druhů biomasy v bublinkové fluidní vrstvě, včetně metodiky vyhodnocení získaných dat. Cílem bude získat experimentální charakteristiku vzniku plynných emisí na teplotě fluidní vrstvy, a dílčí a globální stechiometrii oxidáčovaďa.
- 3) provedení experimentů dle vytvořeného schématu na laboratorní jednotce miniBFBC, zpracování a vyhodnocení získaných dat, formulace výsledků a závěrů.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Pavel Skopec, Ph.D. ústav energetiky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **21.04.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **10.06.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2023**

Ing. Pavel Skopec, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem „Charakteristika spalování dřevní a nedřevní biomasy v bublinkové fluidní vrstvě“ vypracovala samostatně pod vedením Ing. Pavla Skopce, Ph.D. a s použitím literatury uvedené na konci diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze Podpis

Poděkování

Ráda bych v první řadě poděkovala svému školiteli Ing. Pavlu Skopcovi, Ph.D. za vedení diplomové práce, cenné podněty a připomínky.

Velké díky patří také mé rodině, která mě po celou dobu studia podporovala.

Anotační list

Jméno autora:	Klára Osičková
Název DP:	Charakteristika spalování dřevní a nedřevní biomasy v bublinkové fluidní vrstvě
Akademický rok:	2021/2022
Ústav:	Ústav energetiky
Vedoucí DP:	Ing. Pavel Skopec, Ph.D.
Rozsah DP:	72 stran, 9 obrázků, 20 tabulek, 20 grafů
Klíčová slova:	Biomasa, Fluidní spalování, Plynné znečišťující látky, Emisní faktor, Konverzní faktor
Anotace:	<p>Tato diplomová práce se zabývá charakteristikou spalování dřevní a nedřevní biomasy v bublinkové fluidní vrstvě s důrazem na vznik plynných znečišťujících látek. V rešeršní části byla popsána biomasová paliva, fluidní spalování a emisní látky vznikající spalováním biomasy. V druhé části práce byla vytvořena metodika pro experimentální měření, které bylo provedeno na laboratorní jednotce kotle s bublinkující fluidní vrstvou s použitím tří biomasových paliv. Získaná data z měření byla vyhodnocena a následně byl posouzen vliv spalovací teploty a přebytku spalovacího vzduchu na vznik plynných znečišťujících látek při spalování.</p>

Abstract

Author:	Klára Osičková
Title:	Charakteristics of combustion of woody and non woody biomass in a bubbling fluidized bed
Academic year:	2021/2022
Department:	Department of Energy Engineering
Supervisor:	Ing. Pavel Skopec, Ph.D.
Extent:	72 pages, 9 figures, 20 tables, 20 charts
Keywords:	Biomass, Fluidized bed combustion, Gaseous pollutants, Emission factor, Conversion factor
Abstract:	<p>This thesis deals with the characteristics of combustion of woody and non-woody biomass in a bubbling fluidized bed with emphasis on the formation of gaseous pollutants. In the research part, biomass fuels, fluidized bed combustion and emissions from biomass combustion were described. In the second part of the thesis, a methodology for experimental measurement was developed and performed on a laboratory unit of a bubbling fluidized bed boiler with three biomass fuels. The obtained data were evaluated and further the influence of combustion temperature and excess combustion air on the formation of gaseous pollutants during combustion was assessed.</p>

Obsah

Seznam použitých symbolů, značek a zkratk.....	- 1 -
1 Úvod	- 3 -
2 Paliva	- 5 -
2.1 Nedřevní biomasa	- 8 -
2.2 Dřevní biomasa	- 9 -
2.3 Odpadní biomasa	- 10 -
3 Legislativa	- 11 -
3.1 Nejlepší dostupné techniky	- 11 -
3.2 Emisní limity.....	- 12 -
3.3 Ekodesign	- 13 -
4 Fluidní spalování.....	- 16 -
4.1 Bublující fluidní vrstva	- 17 -
4.2 Cirkulující fluidní vrstva.....	- 18 -
5 Základní emise při spalování	- 19 -
5.1 Oxid uhelnatý.....	- 19 -
5.2 Oxidy dusíku.....	- 19 -
5.3 Oxid siřičitý.....	- 22 -
5.4 Emise chloru.....	- 23 -
5.5 Emise fluoru	- 24 -
5.6 Polychlorované dibenzo-p-dioxiny a dibenzofurany	- 24 -
5.7 Tuhé znečišťující látky	- 25 -
6 Experimentální část.....	- 26 -
6.1 Popis měřících přístrojů	- 26 -
6.2 Popis experimentálního zařízení.....	- 27 -
6.3 Použité materiály	- 29 -

6.4	Charakteristika inertního materiálu.....	- 30 -
6.5	Metodika měření	- 30 -
6.6	Konverzní faktor N-NO _x	- 33 -
7	Průběh a vyhodnocení experimentálního měření	- 34 -
7.1	Vliv teploty fluidní vrstvy	- 34 -
7.2	Vliv přebytku spalovacího vzduchu.....	- 42 -
7.3	Vliv stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu	- 49 -
7.4	Chlorovodík a fluorovodík.....	- 55 -
8	Závěr.....	- 56 -
	Použitá literatura	- 58 -
	Seznam obrázků.....	- 62 -
	Seznam tabulek	- 63 -

Seznam použitých symbolů, značek a zkratek

C^{daf}	[-]	Obsah uhlíku v hořlavíně
C^r	[-]	Obsah uhlíku v původním vzorku paliva
d_{mean}	[mm]	Střední průměr částic inertního materiálu
d_{mode}	[mm]	Nejčastější průměr částic inertního materiálu
EF_{mass}^X	[mg · kg ⁻¹]	Emisní faktor vztažený na hmotnost paliva
EF_{LHV}^X	[g/G]	Emisní faktor vztažený na výhřevnost paliva
H^{daf}	[-]	Obsah vodíku v hořlavíně
H^r	[-]	Obsah vodíku v původním vzorku paliva
LHV	[MJ · kg ⁻¹]	Výhřevnost paliva
M_x	[g · mol ⁻¹]	Molekulová hmotnost
N^{daf}	[-]	Obsah dusíku v hořlavíně
N^r	[-]	Obsah dusíku v původním vzorku paliva
O^{daf}	[-]	Obsah kyslíku v hořlavíně
O^r	[-]	Obsah kyslíku v původním vzorku paliva
$O_{2,meas}$	[%]	Měřená koncentrace kyslíku
$O_{2,ref}$	[%]	Referenční koncentrace kyslíku
p_N	[Pa]	Normální tlak
R	[J · K ⁻¹ · mol ⁻¹]	Univerzální plynová konstanta
S^{daf}	[-]	Obsah síry v hořlavíně
S^r	[-]	Obsah síry v původním vzorku paliva
T_N	[K]	Normální teplota
V_{CA}	[m ³ _N · kg ⁻¹]	Měrný objem spalovacího vzduchu
V_{FG}	[m ³ _N · kg ⁻¹]	Měrný objem spalin
V_{NO_2}	[m ³ _N · kg ⁻¹]	Objem oxidu dusičitého ve spalinách
X_{NO_x}	[-]	Konverzní faktor NO _x
ε	[-]	Mezerovitost
λ	[-]	Množství přebytečného spalovacího vzduchu
ρ_b	[kg · m ⁻³]	Sypná hmotnost

ρ_s	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	Hustota inertního materiálu
ρ_m^X	$[\text{mg} \cdot \text{m}_N^{-3}]$	Hmotnostní koncentrace jednotlivých znečišťujících látek
ρ_x	$[\text{mg} \cdot \text{m}_N^{-3}]$	Hmotnostní koncentrace jednotlivých znečišťujících látek s přepočtem na referenční kyslík
φ	$[-]$	Sféricita
φ_{NO_x}	$[-]$	Koncentrace NO_x ve spalinách
$\varphi_{NO_x(max)}$	$[-]$	Maximální koncentrace NO_x ve spalinách
φ_x	$[\text{ppm}]$	Měřená koncentrace jednotlivých emisních látek
BAT		Best Available Techniques (Nejlepší dostupné techniky)
BREF		BAT Reference Documents (Referenční dokumenty o BAT)
NA		Not Available (Není dostupné)
OZE		Obnovitelné zdroje energie
PPSV		Primární přívod spalovacího vzduchu
PZE		Primární zdroje energie
SPSV		Stupňovitý přívod spalovacího vzduchu

1 Úvod

Tato diplomová práce se zabývá experimentálním měřením plynných znečišťujících látek při spalování biomasy na experimentální laboratorní jednotce kotle s bublinkující fluidní vrstvou umístěné ve výzkumné laboratoři Juliska, která patří pod Ústav energetiky Fakulty strojní ČVUT.

Vzhledem k postupným snahám o odchod od fosilních paliv dochází k tendenci navyšování produkce energie z biomasy, která je obnovitelným zdrojem energie (OZE) a z hlediska znečišťování ovzduší jejich vhodnější náhradou. Při spalování biomasy je ale také žádoucí omezovat vznik znečišťujících látek, čehož lze dosáhnout optimalizací průběhu spalování.

Teoretická část diplomové práce začíná kapitolou zabývající se biomasovými palivy a jejich využitím a potenciálem. Biomasa je zde definována podle legislativy a rozdělena na nedřevní, dřevní a odpadní. Jsou popsány její vlastnosti, výhody a nevýhody a vliv různých faktorů na její produkci a využití z hlediska spalování pro výrobu energie.

V další kapitole je vysvětlena problematika legislativy z hlediska povoleného množství produkovaných emisí ze spalování pro zdroje do 50 MW. Jsou zde uvedeny emisní limity pro jednotlivé znečišťující látky měřené v experimentální části práce a zároveň jsou zde popsány i požadavky na ekodesign.

Následující kapitola obsahuje popis fluidního spalování a to v bublinkující a cirkulující fluidní vrstvě. Popisuje výkonové rozsahy vhodné pro fluidní spalování, používané inertní materiály a vhodné rozsahy používaných teplot a množství přebytečného vzduchu. Dále jsou zde shrnuty výhody a nevýhody spalování při využití bublinkující a cirkulující fluidní vrstvy.

Poslední kapitolou teoretické části diplomové práce je popis jednotlivých druhů emisí, z hlediska jejich vzniku a škodlivosti pro člověka a životní prostředí. V této kapitole jsou zahrnuty převážně emise vyhodnocované v experimentální části práce, jejichž množství bylo měřeno v průběhu spalování paliv. Jde o oxid uhelnatý (CO), oxidy dusíku (NO_x), oxid siřičitý (SO_2), chlorovodík (HCl) a fluorovodík (HF). Dále jsou v rešeršní části uvedeny i polychlorované dibenzo-p-dioxiny a dibenzofurany (PCDD/F) a tuhé znečišťující látky (TZL),

kteřé jsou také relevantní při spalování biomasy. Experimentální část práce se jimi ale již nezabývá.

Praktická část práce se zabývá experimentálním měřením při spalování tří typů paliv, a to pelet ze smrkového dřeva, slunečnicových slupek a obilných plev. Na začátku kapitoly jsou popsány měřicí přístroje použité pro měření emisí a experimentální zařízení fluidního kotle, na kterém byly experimenty prováděny s použitím křemičitého písku jako inertního materiálu pro fluidní vrstvu. Následně je uvedena charakteristika jednotlivých paliv z hlediska prvkového složení a jejich vlastností a popsána metodika experimentálního měření, včetně výpočtů pro vyhodnocení množství emisí a emisního a konverzního faktoru.

Praktická část práce proběhla pro celkem osmnáct různých stavů, přičemž pro každé ze tří paliv bylo naměřeno šest různých stavů. Pro srovnání vlivu teploty a koncentrace kyslíku ve spalinách na produkované množství emisí v průběhu spalování byly měřeny stavy při stejné teplotě a různém množství koncentrace kyslíku a stavy při stejném množství koncentrace kyslíku a různých teplotách. Dále zde bylo zahrnuto spalování při využití stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu.

Závěrečná kapitola diplomové práce se zabývá vyhodnocením experimentálních měření. Obsahuje výsledky měření z hlediska produkce emisí a vlivu teploty a přebytku spalovacího vzduchu na průběh spalování. Jsou zde vyhodnoceny emise CO a NO_x pro paliva z pelet ze smrkového dřeva a slunečnicových slupek. V případě pelet z obilných plev je navíc zahrnut i SO₂. Pro porovnání vlivu teploty, přebytku spalovacího vzduchu a využití stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu byly vypočteny a graficky znázorněny emisní faktory pro tyto znečišťující látky a konverzní faktor NO_x pro zhodnocení vlivu množství dusíku vázaného v palivu na vznik NO_x. Také zde byly vytvořeny teplotní profily průběhu spalování. Emise HCl a HF byly vyhodnoceny u každého použitého paliva pouze pro dva stavy.

2 Paliva

Definice biomasy dle legislativy

V legislativě je biomasa definována podle vyhlášky §2 písm. a) zákona 2012 – 415 Sb. [1]. Pro účely této vyhlášky se rozumí biomasou ke spalování ve stacionárních zdrojích produkt, který je tvořen z rostlinného materiálu pocházejícího ze zemědělství nebo lesnictví, a který lze použít jako palivo za účelem získání jeho energetického obsahu, a dále následující odpad použitý jako palivo:

1. rostlinný odpad ze zemědělství nebo lesnictví,
2. rostlinný odpad z potravinářského průmyslu, pokud se využije vyrobené teplo,
3. rostlinný odpad z výroby čerstvé vlákniny a z výroby papíru z buničiny, pokud se spoluspaluje v místě výroby a vzniklé teplo se využije,
4. korkový odpad,
5. dřevný odpad s výjimkou dřevného odpadu, který může obsahovat halogenované organické sloučeniny nebo těžké kovy v důsledku ošetření látkami na ochranu dřeva nebo nátěrovými hmotami, zahrnující především takovéto dřevné odpady pocházející ze stavebnictví a z demolic.

Dělení biomasy

V této práci je provedeno dělení jednotlivých typů biomasy využívané pro energetické účely na cíleně pěstovanou a odpadní, neboli zbytkovou, biomasu.

Cíleně pěstovanou biomasu lze členit na nedřevní biomasu, ze které se využívají převážně energetické byliny, a dřevní biomasu, kde se převážně produkují rychlerostoucí dřeviny. [2; 3]

Za odpadní dřevní biomasu se považuje například štěpka, která je odpadním produktem lesního hospodářství. Dále se za odpadní biomasu považují odpady z celulózo-papírenského, dřevařského a nábytkářského průmyslu, odpady vzniklé v potravinářském průmyslu, komunální bioodpad nebo zbytky rostlin, vzniklé při údržbě krajiny a zemědělské prvovýroby. [2]

Palivo z biomasy existuje v různých formách, obvykle jako dřevo, kůra, biomasa ze sklizní, organické odpady, čistírenské kaly apod. [3; 4]

Složení biomasových paliv

Standardně se z pohledu fyzikálních a chemických vlastností považuje biomasa za tuhé palivo, pro které se provádí hrubý rozbor z hlediska jejího složení. Mezi fyzikální vlastnosti potřebné pro hrubý rozbor biomasy patří výhřevnost a spalné teplo paliva, hmotnostní obsah vody, popela a prchavého podílu paliva v procentech a dále obsah hořlaviny. [3; 4]

Paliva se skládají z hořlaviny a balastu (přítěže). Hořlavinou se myslí část, skládající se z aktivních a pasivních látek, ze které se oxidací uvolňuje teplo chemicky vázané v palivu. Za aktivní látky se považují uhlík, vodík a síra, které při spalování produkují teplo. Pasivní látky jsou kyslík a dusík, jež jsou chemicky vázány na uhlovodíky a teplo nedodávají. [2; 3]

Biomasa obsahuje v hořlavině převážně uhlík a kyslík a také kolem 6 % vodíku. Dále obsahuje minimum popela a zanedbatelný obsah síry, který se u dřevní biomasy obvykle pohybuje pod 0,1 %. V případě využití zemědělských rostlin jako paliva může být podíl síry vyšší, obvykle ale nepřesahuje 0,5 %. Biomasa také obsahuje relativně nízký obsah dusíku, který se u dřeva pohybuje mezi 0,1 až 0,5 %. U zemědělských rostlin může být tento podíl i nad 1 %. V některých případech může obsahovat i zvýšené množství chloru, fluoru, draslíku a těžkých kovů, což má za následek korozi a znečištění životního prostředí. [2; 3]

Dalšími důležitými údaji jsou vlastnosti popelovin, které mají nízký bod měknutí a hrozí tak nebezpečí jejich spékání. U popeloviny se tedy z tohoto důvodu určuje teplota spékání, měknutí, tečení a tání. Dalším důležitým faktorem je i obsah vody v biomase, který bývá často relativně vysoký, což může bez vysušení biomasy snižovat její výhřevnost. Podíl prchavé hořlaviny v biomase se pohybuje v rozmezí od 70 do 85 %. Je tedy vhodné přivádět do horní části spalovací komory sekundární vzduch, aby docházelo k lepšímu dohořívání některých složek prchavé hořlaviny, majících podíl na množství vypouštěných znečišťujících látek. [3]

Energetické využití biomasy

Z hlediska energetického využití biomasy je možné vyrábět teplo přímým spalováním. Pro tyto účely se může používat například sláma, dřevo, nebo dřevní odpady. Dále je možné biomasu upravovat na fytopaliva, která mají vyšší kvalitu, než přímo spálená paliva. Jde například o pelety nebo brikety. Biomasa se dá také použít jako výchozí surovina pro výrobu plyných a kapalných zdrojů energie, které je možné dále využívat například v kogeneračních jednotkách pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla. [3; 5]

Podíl biomasy na brutto výrobě elektřiny byl 2 499 GWh za rok 2020 a tvoří přibližně 3 % paliv a technologií podílejících se na hrubé výrobě elektřiny k roku 2020. Po odečtení vlastní technologické spotřeby elektřiny je pak výroba elektřiny netto z biomasy 2 318 GWh ročně. Pro hrubou výrobu elektřiny se přibližně z 50 % využívá dřevní biomasa zahrnující piliny, kůru, štěpky a dřevní odpad. Zbytek výroby tvoří převážně celulózové výluhy a dále se používají brikety a pelety, kapalná biopaliva a neaglomerované rostlinné materiály. [6]

Podíl OZE v ČR na výrobě elektřiny brutto byl za rok 2020 celkem 10 291 GWh, což bylo 14,42 % celkové hrubé výroby elektřiny. Podíl biomasy na výrobě elektřiny brutto z OZE je 24,28 %. [6]

Vývoj výroby elektřiny brutto a hrubé výroby tepla pro prodej z biomasy mezi lety 2014 – 2020 lze vidět v Tab. 1. Je zde zahrnuto i procentuální zastoupení využití biomasy vzhledem k využívání primárních zdrojů energie (PZE).

Tab. 1: Výroba elektřiny brutto a tepla z biomasy mezi lety 2014 - 2019 (procentuální zastoupení vztaženo k PZE) [7]

Rok	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Výroba elektřiny brutto [GWh]	2008	2091	2067	2211	2119	2399	2499
Výroba elektřiny brutto [%]	2,33	2,49	2,48	2,54	2,41	2,76	3,07
Hrubá výroba tepla pro prodej [TJ]	5821	6414	6727	7161	6780	7682	8964
Hrubá výroba tepla pro prodej [%]	4,86	5,29	5,27	5,82	5,73	6,60	7,94

Výhody a nevýhody využití biomasy pro energetické účely

Při spalování biomasy vzniká oxid uhličitý (CO_2), který ale globálně nezvyšuje koncentraci CO_2 v atmosféře, jelikož rostliny, jakožto zdroj biomasy, při svém růstu přijímají CO_2 z atmosféry a díky fotosyntéze je přeměňují na uhlíkaté látky důležité pro stavbu rostlinných těl. Dochází tak k vázání (fixaci) CO_2 z atmosféry do organické hmoty. Přibližně stejné množství CO_2 , které se při spalování biomasy vyprodukuje, se při její produkci spotřebovává. Biomasa se tedy považuje za CO_2 neutrální palivo. [3; 8]

Spalování energetické biomasy je tedy pro podmínky v ČR jednou z nejvýznamnějších možností při zvyšování produkce energie z OZE. Použití biomasy pro energetické účely je vhodné pro podporu decentralizované energetiky, kde se dá biomasa dobře využít například při provozu kogeneračních jednotek. Zvyšuje se tak zároveň i energetická bezpečnost a nezávislost státu na dovozu energií. [3]

Jedním z problémů využívání a spalování biomasy ve větším množství v ČR i v Evropě obecně je, že nestačí místní zdroje. Pro zvyšování podílu biomasy na energetickém využití by bylo žádoucí zvyšovat množství jejího cíleného pěstování. Dále mohou také nastávat problémy s využitím biomasy. Jde například o její zpracování, sezónnost, nebo skladování, které komplikují spolehlivost dlouhodobých dodávek. Zároveň je z hlediska nákladů na dovoz paliv z biomasy a produkci emisí jejich přepravou vhodné, aby bylo dostatečné množství paliva v blízkosti jeho spotřeby. [3]

2.1 Nedřevní biomasa

Za nedřevní biomasu se považuje velké množství rostlin bylinného charakteru, někdy nazývané jako energetické byliny/rostliny. Dělí se na jednoleté a víceleté (vytrvalé) rostliny. Do této skupiny patří také energetické trávy. Konkrétní příklady jednotlivých druhů nedřevní biomasy jsou uvedeny v Tab. 2. [3; 5]

Výhodou nedřevní biomasy je, že se vysévá, a dovoluje tak půdě okamžitý přechod na potravinářské využití. Zároveň je její pěstování levnější, než u rychlerostoucích dřevin a její produkce je rychlejší, jelikož je možné získávat biomasu nejpozději v druhém roce po vysazení.

Některé tyto rostliny navíc mohou nalézt využití i mimo energetické účely, například v textilním a chemickém průmyslu, v zemědělství, nebo v potravinářství. [3]

Jednotlivé rostliny, které se pěstují pro energetické využití, mají vlastní požadované podmínky a potřebnou technologickou náročnost pro pěstování. Je tedy nutné tyto specifické pěstební požadavky, jako je například vláha, teplota oblasti, množství světla, vydatnost hnojení, pH půdy apod., zohlednit. [3]

Tab. 2: Příklady druhů nedřevní biomasy [3; 5]

Jednoleté až dvouleté rostliny	Vytrvalé rostliny	Energetické trávy
Čiroky	Bělotrn kulatohlavý	Kostřava rákosovitá
Hořčice sarepská	Čičorka pestrá	Kostřavice bezbranná
Komonice bílá	Energetický šťovík	Lesknice rákosovitá
Konopí seté	Jestřabina východní	Ovsík vyvýšený
Laskavec	Křídlatka česká	Ozdobnice čínská
Pupalka dvouletá	Lesknice rákosovitá	Srha laločnatá
Ředkev olejná	Oman pravý	Sveřep bezbranný
Sléz přeslenitý (krmný)	Ozdobnice čínská	Sveřep horský
Súdánská tráva	Sléz vytrvalý	Proso vytrvalé
Světlice barvířská	Slunečnice topinambur	Psineček veliký

2.2 Dřevní biomasa

Zdroje dřevní biomasy mohou pocházet například z lesů, plantáží pro rychlerostoucí dřeviny nebo z péče o krajinu ve formě odpadu. Drobná dřevní biomasa se sklízí pomocí motorových pil nebo křovinořezů. Pro sklizeň dřevní biomasy větších rozměrů, což mohou být například stromy při probírce, předmýtní těžbě a prořezávce, nebo některé typy rychlerostoucích dřevin, se používají motorové pily, traktory, harvestorové těžební stroje a nakládací a vyvážecí soupravy. Technologie sklizení záleží na typu a stáří dřeviny. [9]

Pro energetické účely se používají převážně rychlerostoucí dřeviny. Jde o dřeviny s krátkou obmýtní dobou, kde hmotový přírůstek převyšuje průměrný hmotový přírůstek ostatních dřevin. Pro podmínky ČR jsou z hlediska pěstování pro energetické účely

nejvýhodnější vrby a topoly. Dále je možné pěstovat například akáty, olše, osiky, břízy atd. Tyto dřeviny produkují velké množství dřeva v prvních několika letech jejich růstu a jejich produkce je relativně levná. [3; 9; 5]

Jednou z nevýhod pěstování rychlerostoucích dřevin jsou vyšší ekonomické náklady z hlediska cíleného pěstování biomasy pro energetické účely. Proto je z ekonomického hlediska výhodnější pěstování energetických bylin, a to zejména víceletých a vytrvalých. [3]

2.3 Odpadní biomasa

Odpadní biomasa zahrnuje odpady z živočišné a rostlinné výroby, odpady z lesní těžby, složky tuhých komunálních odpadů s organickým podílem, mezi které spadají například i čistírenské kaly. Dále se sem řadí organické odpady z potravinářských nebo průmyslových produkcí a biomasa ve formě kombinovaných paliv po smíchání s dalšími hořlavými látkami. [3; 8]

Lesní odpady vznikají například při těžbě dřeva jako zbytková biomasa, kdy část dřevní hmoty zůstává v lese nevyužita. Do tohoto typu odpadů patří například dřevní hmota z lesních probírek, větve, kořeny, kůra, palivové dřevo, pařezy, manipulační odřezky apod. [3]

Mezi rostlinné zbytky patří vedlejší produkty plodin ze zemědělské prvovýroby, což zahrnuje například slámu z obilovin a řepky, nebo kukuřičné a slunečnicové zbytky. Rovněž se do této skupiny zařazují zbytky po likvidaci křovin a lesních náletů nebo dřevní odpady ze sadů, vinic, luk a pastvin. [3; 5; 8]

Největší uplatnění z hlediska energetického využití odpadní biomasy má obilná a řepková sláma. Co se týká realistických scénářů, do budoucna by bylo možné produkovat ročně až 6 050 TJ obilné slámy a 9 800 TJ řepkové slámy. [8]

3 Legislativa

V podmínkách ČR není možné pěstovat biomasu v rozsáhlejší množství z důvodu nedostatečného množství využitelné plochy. Při jejím spalování se tedy používají převážně zařízení s menšími výkony. Uvedeny jsou tedy emisní limity pro povolené množství produkovaných emisí ze spalování biomasy a alternativních zdrojů pro zdroje do 50 MW včetně, které jsou založeny na Nejlepších dostupných technikách (BAT, z angl. Best Available Techniques). Pro zařízení s většími výkony nemá smysl emisní limity uvádět z výše zmíněných důvodů.

3.1 Nejlepší dostupné techniky

BAT se používají v mezinárodních dokumentech, které se zabývají ochranou životního prostředí, a v případě jejich použití v praxi se dosahuje vysoké ochrany životního prostředí. Jde o nejlepší dostupné technologie s velmi nízkou produkcí emisí z těchto technologií za použití kvalitních paliv. [10]

BAT se týká provozovatelů zařízení pro šest kategorií: energetika, výroba a zpracování kovů, zpracování nerostů, chemický průmysl, nakládání s odpady a ostatní průmyslové činnosti. Tyto subjekty mají ze zákona povinnost mít pro provoz zařízení integrované povolení a provozovat zařízení v souladu s vydaným integrovaným povolením. Bez platného integrovaného povolení provozovatel nesmí zařízení provozovat. [10]

Referenční dokumenty BREF (z angl. BAT Reference Documents) jsou souhrnem BAT a jsou zpracovány pro jednotlivé kategorie průmyslových činností. [10]

Vzhledem k tomu, že pro kotle na biomasu se používají převážně malá nebo středně velká spalovací zařízení, nejsou emisní limity stanoveny přímo referenčními dokumenty BREF. Emisní limity pro tato spalovací zařízení z nich ale vychází a jsou stanoveny v dodatcích k těmto dokumentům.

3.2 Emisní limity

Pro následující část podle §2 písm. a) zákona 2012 – 415 Sb. [11] podle části II platí specifické emisní limity pro spalovací stacionární zdroje o celkovém jmenovitém tepelném příkonu vyšším než 0,3 MW a nižším než 50 MW. Jsou zde uvedeny emisní limity pro SO₂, NO_x, TZL a CO.

Specifické emisní limity pro spalovací stacionární zdroje s výjimkou pístových spalovacích motorů a plynových turbín, platné od 19. prosince 2018 a od 1. ledna 2025 (Tab. 3, Tab. 4), jsou vztaženy k celkovému jmenovitému tepelnému příkonu, na normální stavové podmínky a suchý plyn při referenčním obsahu kyslíku v odpadním plynu, a to 6 % v případě pevných paliv s výjimkou biomasy, 11 % v případě biomasy a 3 % v případě kapalných a plyných paliv.

Tab. 3: Specifické emisní limity pro stacionární zdroje uvedené do provozu 20. prosince 2018 nebo později [11]

Specifické emisní limity [mg · m ⁻³]											
>0,3 až < 1 MW				1 – 5 MW				> 5 – 50 MW			
SO ₂	NO _x	TZL	CO	SO ₂	NO _x	TZL	CO	SO ₂	NO _x	TZL	CO
Platnost od 20. prosince 2018 do 31. prosince 2024 (pro pevná paliva – biomasu)											
-	600	100	400	133 ¹⁾	333	33	500	133 ¹⁾	200	13 ²⁾	300 ³⁾
Platnost od 1. ledna 2025 (pro pevná paliva – biomasu)											
-	600	100	400	133 ¹⁾	333	33	500	133 ¹⁾	200	13 ²⁾	300 ³⁾

Vysvětlivky:

¹⁾ Emisní limit neplatí pro spalování výlučně dřevní biomasy.

²⁾ V případě spalovacích stacionárních zdrojů o celkovém jmenovitém tepelném příkonu do 20 MW včetně platí emisní limit 20 mg · m⁻³.

³⁾ Platí v případě spalování výlisků z biomasy. Pro spalování ostatních druhů biomasy platí emisní limit 500 mg · m⁻³.

Tab. 4: Specifické emisní limity pro stacionární zdroje uvedené do provozu před 20. prosincem 2018 [11]

Specifické emisní limity [$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$]											
>0,3 až < 1 MW				1 – 5 MW				> 5 – 50 MW			
SO ₂	NO _x	TZL	CO	SO ₂	NO _x	TZL	CO	SO ₂	NO _x	TZL	CO
Platnost od 20. prosince 2018 do 31. prosince 2024 (pro pevná paliva včetně biomasy)											
-	600	100	400	-	500	50	500	1500 ¹⁾	500	30	300 500 ²⁾
Platnost od 1. ledna 2025 (pro biomasu)											
-	600	100	400	133 ³⁾	433	33	500	133 ³⁾	433	20 ⁴⁾	300 ⁵⁾

Vysvětlivky:

- 1) Na spalovací stacionární zdroje spalující hnědé uhlí, provozované nejvýše 3200 provozních hodin ročně, se vztahuje specifický emisní limit $2000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$.
- 2) Platí v případě spalování biomasy pro spalování ve stacionárních zdrojích s výjimkou spalování výlisků z takové biomasy.
- 3) Neplatí pro výlučné spalování dřevní biomasy. Pro spalování slámy platí emisní limit $200 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$.
- 4) Pro stacionární zdroje o jmenovitém tepelném příkonu 20 MW a nižším platí emisní limit $33 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$.
- 5) Platí v případě spalování výlisků z biomasy. Pro spalování ostatních druhů biomasy platí emisní limit $500 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

3.3 Ekodesign

Směrnice o ekodesignu (2009/125/ES) určuje, jaké parametry musí splňovat kotle na tuhá paliva a interiérová topidla, která se uvádějí na trh v rámci Evropské unie. Z toho vychází nařízení, které stanovuje požadavky na ekodesign pro uvádění na trh a uvádění do provozu pro lokální topidla, se jmenovitým tepelným výkonem do 50 kW, a pro kotle na tuhá paliva se jmenovitým tepelným výkonem do 120 kW. Od 1. ledna 2020 musí kotle na tuhá

paliva vyhovovat emisním limitům 5. třídy podle EN 303-5 a od 1. ledna 2022 musí těmto limitům vyhovovat také lokální topidla. [12; 13]

Pro ekodesign jsou z hlediska paliv definovány následující pojmy podle Nařízení Komise (EU) 2015/1189 ze dne 28. dubna 2015 [13]:

Tuhým palivem se myslí palivo, které je za běžných pokojových teplot tuhé.

Biomasa se rozumí biologicky rozložitelná část produktů, odpadů a zbytků biologického původu ze zemědělství (včetně rostlinných a živočišných látek), lesnictví a souvisejících odvětví, včetně rybolovu a akvakultury, jakož i biologicky rozložitelná část průmyslového a komunálního odpadu.

Dřevní biomasa se rozumí biomasa pocházející ze stromů, křovin a keřů, včetně dřevěných polen, dřevní štěpky, lisovaného dřeva ve formě pelet, lisovaného dřeva ve formě briket a pilin.

Ostatní dřevní biomasa se rozumí jiná dřevní biomasa než dřevěná polena s obsahem vlhkosti nejvýše 25 %, dřevní štěpka s obsahem vlhkosti 15 % nebo vyšší, lisované dřevo ve formě pelet nebo briket nebo piliny s obsahem vlhkosti nejvýše 50 %.

Nedřevní biomasa se rozumí jiná než dřevní biomasa, včetně slámy, ozdobnice čínské, rákosu, jader, obilovin, olivových pecek a pokrutin a skořápek z ořechů.

Požadavky na ekodesign nabyly pro kotle na tuhá paliva platnosti od 1. ledna 2020 a musí splňovat požadavky uvedené v Tab. 5. Zároveň musí být tyto požadavky splněny pro referenční palivo i pro jakékoli jiné vhodné palivo pro kotel na tuhá paliva a emisní limity jsou uváděny při 10 % podílu kyslíku. [12; 13]

Tab. 5: Požadavky a limity na ekodesign pro kotle na tuhá paliva s platností od 1. ledna. 2020 [13]

Kotle na tuhá paliva – parametry pro ekodesign	Limitní hodnoty
Sezónní energetická účinnost vytápění vnitřních prostorů [%]	75 (výkon kotle ≤ 20 kW)
	77 (výkon kotle > 20 kW)
Sezónní emise částic z vytápění vnitřních prostorů [mg · m ⁻³]	40 (kotle s automatickým přikládáním)
	60 (kotle s ručním přikládáním)
Sezónní emise organických plynných sloučenin z vytápění vnitřních prostorů [mg · m ⁻³]	20 (kotle s automatickým přikládáním)
	30 (kotle s ručním přikládáním)
Sezónní emise CO z vytápění vnitřních prostorů [mg · m ⁻³]	500 (kotle s automatickým přikládáním)
	700 (kotle s ručním přikládáním)
Sezónní emise NO _x z vytápění vnitřních prostorů vyjádřené ekvivalentem NO ₂ [mg · m ⁻³]	200 (kotle na biomasu)
	350 (kotle na fosilní paliva)

V Tab. 6 jsou uvedeny emisní limity a účinnosti interiérových topidel s platností od začátku roku 2022. Všechny uvedené emisní limity platí při 13 % podílu kyslíku.

Tab. 6: Přehled schválených hodnot emisních limitů a účinností pro interiérová topidla s platností od 1. ledna. 2022 [12]

Interiérová topidla – parametry pro ekodesign	Limitní hodnoty		
	Otevřená	Uzavřená vč. sporáků	Peletová
Sezónní energetická účinnost vytápění [%]	30	65	79
Pevné částice (PM): HF [mg · m ⁻³] / DT [g · kg ⁻¹] ¹⁾	50/6	40/5	20/2,5
Organické plynné sloučeniny (OGC) [mg · m ⁻³]	120	120	60
CO [mg · m ⁻³]	2000	1500	300
NO _x [mg · m ⁻³] ²⁾	200/300	200/300	200/300

Vysvětlivky:

¹⁾ Volitelná metodika měření obsahu PM ve spalinách (HF = vyhřívaný filtr, DT = ředící tunel).

²⁾ Emisní limit NO_x pro lokální topidla na biomasu/fosilní paliva.

4 Fluidní spalování

Fluidní spalování se začalo používat v roce 1960 pro spalování komunálních a průmyslových odpadů. Pro spalování biomasy se většinou využívá fluidní spalování při výkonech vyšších než 10 MW, pro nižší výkony je výhodnější spalování biomasy na roštu. Fluidní spalování se provádí ve dvou technologických aplikacích a to v bublinkující fluidní vrstvě a cirkulující fluidní vrstvě. [14; 15]

Jelikož má biomasa nízký obsah popelovin, nevyužívá se pro její spalování ve fluidní vrstvě popel ze spáleného paliva, ale inertní materiály, kterými jsou běžně například křemičité písky, keramické materiály, nebo olivíny. Inertní materiály reprezentují 90 – 98 % směsi s palivem. [14; 15; 16]

Primární spalovací vzduch vstupuje do spalovacího prostoru ze spodní části spalovací komory a vrstvu fluidizuje tak, že směs inertního materiálu a paliva začne probublávat. Ve vrstvě díky tomu dochází k intenzivnímu mísení a přestupu tepla, což poskytuje dobré podmínky pro úplné spalování se součinitelem přebytku vzduchu $\lambda = 1,2 - 1,3$ pro spalování s bublinkovou fluidní vrstvou a $\lambda = 1,1 - 1,2$ pro spalování s cirkulující fluidní vrstvou. Spalovací teplota se z důvodu zabraňování spékání popela ve spalovací komoře pohybuje mezi 750 – 900 °C a je možné ji korigovat například vstříkáváním vody, množstvím vzduchu, nebo recirkulací spalin. [14]

Výhodou fluidního spalování, ve srovnání se spalováním na roštu, je vyšší stabilita v souvislosti s kolísáním vlastností paliva, nižší hodnoty emisí znečišťujících látek a lepší možnost regulace spalování. Fluidní spalování je díky dobrému promíchávání velmi flexibilní a vhodné například i pro méně kvalitní paliva, odpadní biomasu, nebo biomasu s vyšší vlhkostí. [14; 16]

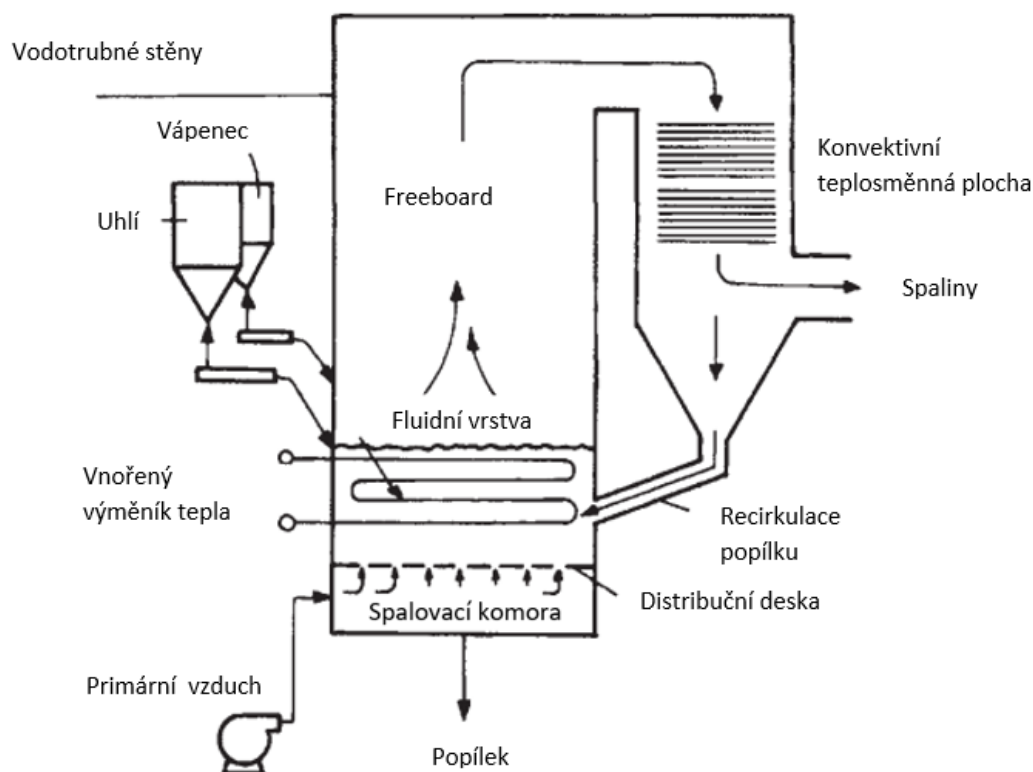
Nevýhodami fluidního spalování je nutnost předúpravy paliva z hlediska velikosti jeho částic (velikost jednotlivých částic se pro spalování s bublinkující fluidní vrstvou doporučuje pod 80 mm a s cirkulující pod 40 mm). Dalším problémem mohou být kovy, které se při využití biomasy s vyšším obsahem alkalických kovů mohou hromadit v popílku. [14]

4.1 Bublinkující fluidní vrstva

Spalování s bublinkující fluidní vrstvou (Obr. 1) se obvykle využívá při výkonech do 30 MW. Velikost inertního materiálu, ze kterého je tato vrstva tvořena, má rozsah přibližně 0,5 – 1 mm v průměru a obvykle se pro tento účel využívají křemičité písky. Rychlost fluidního vzduchu se pohybuje mezi 1 – 2 m · s⁻¹. V moderních bublinkujících fluidních zařízeních jsou možné operace v rozsahu 60 – 100 % výkonu. [14]

Primární vzduch je přiváděn do spodní části fluidní vrstvy a fluidizuje ji. Sekundární vzduch je pak přiváděn skrz trysky v horní části spalovací komory (tzv. freeboard).

Mezi výhody spalování s bublinkující fluidní vrstvou patří flexibilita týkající se velikosti částic a obsahu vlhkosti u biomasových paliv. Dále je možné využívat i směsi různých druhů biomasy nebo spoluspalování biomasy s jinými typy paliv. Zároveň je možné u moderních kotlů s bublinkující fluidní vrstvou držet teploty v rozsahu mezi 750 – 850 °C. Z tohoto důvodu je vhodné spalovat i paliva, která mají nízkou teplotu tání popela. [14; 4]



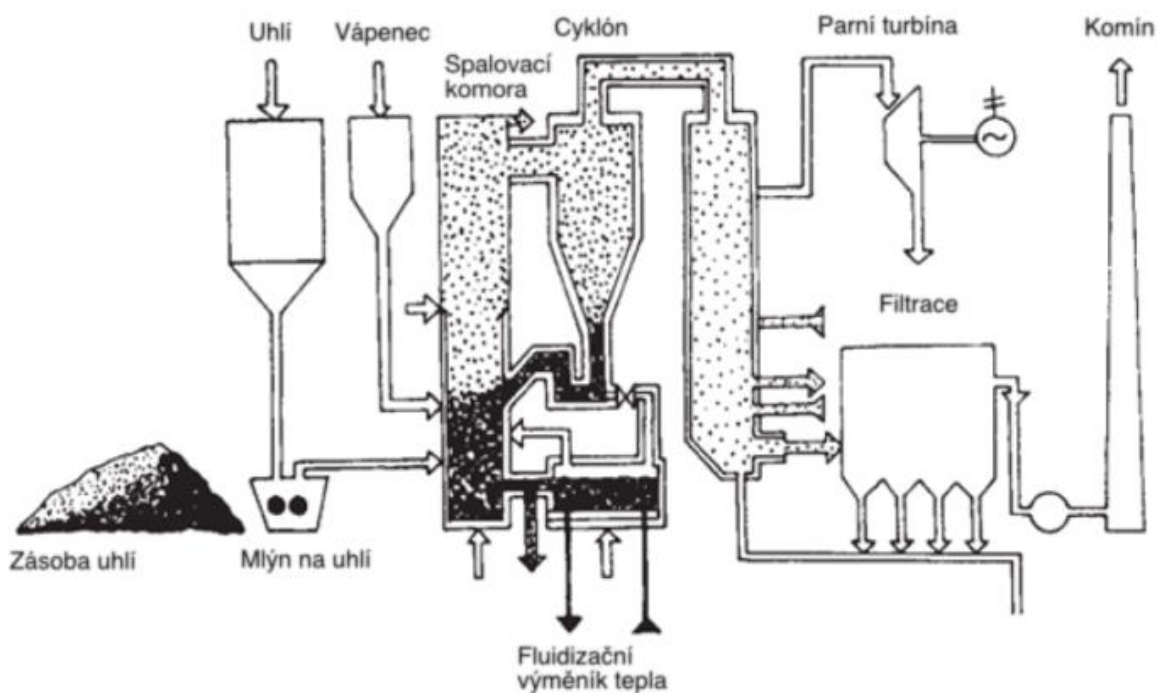
Obr. 1: Schéma spalování v kotli s bublinkující fluidní vrstvou [17]

4.2 Cirkulující fluidní vrstva

Z důvodu vyšší náročnosti na udržení teploty u vyšších výkonů při spalování s bublinkující fluidní vrstvou se u výkonů nad 30 MW začíná používat cirkulující fluidní vrstva (Obr. 2), která má lepší schopnost přenosu tepla. Ve srovnání s bublinkující fluidní vrstvou bývá obvykle tvořena z materiálu s menšími částicemi. Používají se částice o průměrech mezi 0,2 – 0,4 mm a fluidní rychlost se navyšuje na hodnoty mezi 5 – 10 m · s⁻¹. [14; 15]

Částice inertního materiálu jsou vynášeny se spalinami, separovány a vráceny zpět do spalovací komory. Teplota fluidní vrstvy se pohybuje mezi 750 – 900 °C. Vyšší turbulence při použití cirkulující fluidní vrstvy vedou ve srovnání s bublinkující fluidní vrstvou k lepšímu přestupu tepla a velmi homogenní teplotě distribuované ve fluidní vrstvě, což je dobré z hlediska stabilnějších spalovacích podmínek. U spalování s cirkulující fluidní vrstvou je zároveň vyšší spalovací účinnost a nižší produkce spalin. [14]

Nevýhodou zařízení s cirkulující fluidní vrstvou je jejich větší velikost a s tím související vyšší cena. Vzniká větší zatížení prachem ve spalinovém tahu a většímu úniku částic písku než u systémů s bublinkující fluidní vrstvou. Dále jsou vyžadovány malé částice paliva, které často způsobují větší investice při předpřípravě paliva. [14]



Obr. 2: Schéma spalování v kotli s cirkulující fluidní vrstvou s pomocnými systémy [17]

5 Základní emise při spalování

Mezi základní plynné znečišťující látky vznikající v průběhu spalování se řadí SO_2 , NO_x a CO . Řeší se i množství CO_2 , který ale není považován za znečišťující látku. Dále jsou v této kapitole zmíněny TZL, polychlorované PCDD/F, HCl a HF. Jelikož se tato diplomová práce zabývá měřením pouze některých emisních látek produkovaných při spalování různých typů biomasy, bude se rešeršní část zabývat pouze těmito znečišťujícími látkami.

5.1 Oxid uhelnatý

CO vzniká jako produkt nedokonalého spalování, převážně při teplotách pod $800\text{ }^\circ\text{C}$, nedostatku kyslíku, nebo příliš krátkém čase hoření. Z těchto důvodů totiž nedojde k oxidaci paliva na CO_2 v dostatečně velké míře, a vzniká tak víc CO . Pokud se CO dostane do atmosféry, je pro jeho přeměnu na CO_2 potřeba až několik let. Jde o bezbarvý plyn, jehož směs se vzduchem je vysoce výbušná. [18; 19]

CO je vysoce toxický plyn. Jeho škodlivost pro člověka spočívá v jeho vazbě na krevní barvivo hemoglobin, která je mnohem silnější než vazba kyslíku k hemoglobinu. Tím dochází k nedostatečnému okysličování orgánů a následné otravě, případně smrti. Jde o nevratný proces. [18; 19]

Snižování CO je často v protikladu se snižováním ostatních škodlivých látek vznikajících při spalování. Pro jeho eliminaci nepoužíváme sekundární metody, ale zasahujeme do spalovacího procesu jako takového.

5.2 Oxidy dusíku

NO_x jsou směsí oxidu dusnatého a oxidu dusičitého, kde hlavním produkovaným NO_x je oxid dusnatý (NO), který tvoří 90 – 95% celkové produkce NO_x . Ten se může v atmosféře dále měnit na oxid dusičitý (NO_2), který je mnohem více toxický a tvoří přibližně 5 – 10 %

celosvětové produkce NO_x . Vznikají převážně při spalovacích procesech reakcí mezi dusíkem a kyslíkem, kdy je dusík oxidován. [2; 14]

NO_x negativně ovlivňují životní prostředí, podporují skleníkový efekt a tvorbu aerosolů. Přispívají k poškozování vegetace, vzniku kyselých dešťů a smogu. Také poškozují materiály a přispívají ke vzniku koroze. Dále poškozují dýchací systém u lidí. [14]

Procesy vzniku NO_x jsou výrazně závislé na teplotě z důvodu vysoké energetické bariéry. Z toho důvodu je ale možné regulovat jejich množství řízením spalovacího procesu. Podle způsobu jejich vzniku se dělí na tři druhy a to palivové, termické a promptní NO_x . Vliv teploty a součinitele přebytku spalovacího vzduchu na tvorbu NO_x lze vidět na Obr. 3. [3; 14; 20]

Palivové NO_x vznikají oxidací dusíkatých složek paliva a jejich množství téměř nezávisí na teplotě. Vznik palivových NO_x roste se zvyšováním přebytku vzduchu a je vyšší při vzrůstajícím obsahu dusíku v použitém palivu. Navíc jsou palivové NO_x vysoce závislé na množství molekulárního kyslíku koncentrovaného v zóně hoření. Pokud je koncentrace molekulárního kyslíku v této zóně nižší, vznik palivových NO_x se omezí. Ve většině případů spalování pevných paliv jsou palivové NO_x hlavním zdrojem emisí NO_x . [2; 20]

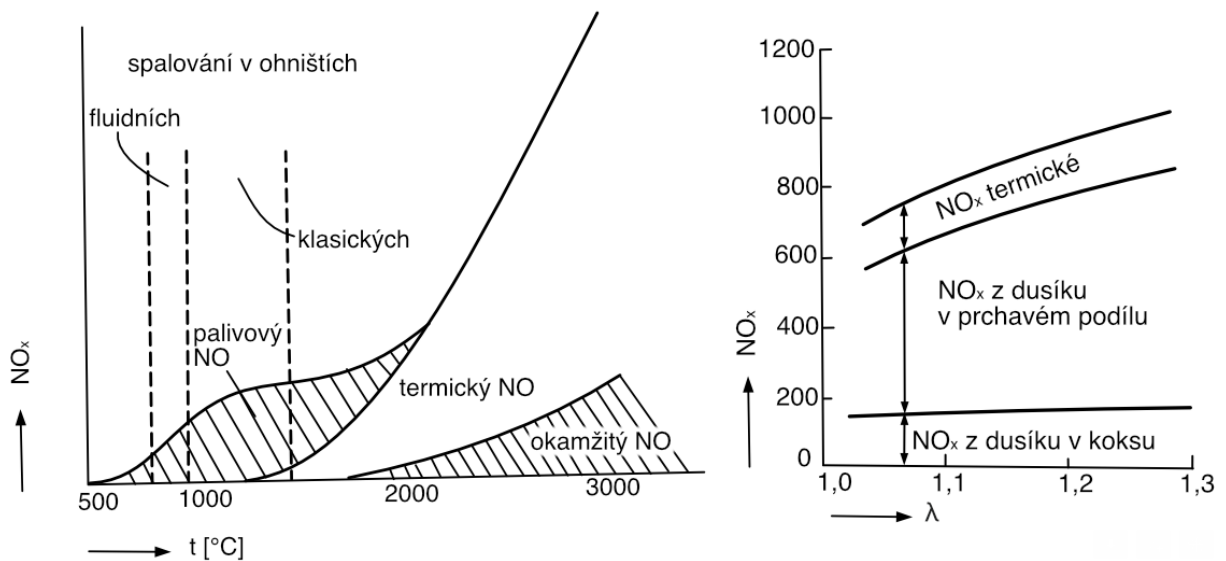
Termické NO_x vznikají reakcí dusíku ve vzduchu s kyslíkovými radikály při teplotách nad $1300\text{ }^\circ\text{C}$. Na jejich tvorbu má velký vliv nejvyšší dosažená teplota a doba trvání reakce. Tvorbu termických NO_x je možné omezovat celkovým snížením teploty používané během spalování a nižším obsahem kyslíku v oblasti ohniště, kde se vyskytují maximální teploty.

K tvorbě termických a palivových NO_x dochází primárně přes reakce, které jsou uvedeny v rovnicích 5.1 a 5.2. [2; 20]



Promptní neboli rychlé NO_x se tvoří v reakcích s nízkou energetickou potřebou, kdy vzniká vazba molekul dusíku s radikály, například reakcí podle rovnice 5.3. Tento vznik je velmi rychlý a má malou závislost na teplotě plamene, hodně ale záleží na hodnotě součinitele přebytku vzduchu. [2; 20]





Obr. 3: Vliv teploty (vlevo) a součinitele přebytku vzduchu (vpravo) na vznik NO_x [21]

NO_x je možné redukovat použitím primárních a sekundárních opatření pro jejich omezování.

Mezi primární opatření patří například snižování teploty vzduchu v zóně hoření, použití nižšího přebytku spalovacího vzduchu nebo postupný přívod paliva. Nejčastěji se jako opatření pro snížení emisí NO_x používá metoda postupného přívodu spalovacího vzduchu, kdy se hořák provozuje v mírně podstechiometrických úrovních za použití součinitele přebytku vzduchu $\alpha = 0,95$. Zbytek spalovacího vzduchu se pak přivádí do oblasti ohniště. [2] [22]

Jako sekundární opatření ke snižování NO_x se používá selektivní katalytická redukce (SCR, z angl. Selective catalytic reduction) a selektivní nekatalytická redukce (SNCR, z angl. Selective non-catalytic reduction), případně jejich kombinace, nebo optimalizace teplotní úrovně v kotli. [4; 14]

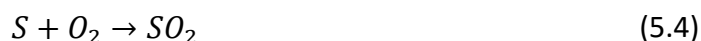
SCR je metoda, kde za použití katalyzátoru s oxidy alkalických kovů dochází k reakci NO_x se čpavkem nebo močovinou. Obvykle se využívá teplot v rozsahu mezi 300 – 450 °C, při kterých reagují NO_x se čpavkem na povrchu katalyzátoru. [22]

SNCR také využívá k redukci NO_x jako činidlo čpavek nebo močovinu, ale oproti SCR není použit katalyzátor. Pro optimální fungování této metody je potřeba udržovat vyšší teploty v rozmezí mezi 800 – 1100 °C, přičemž konkrétní teplota velmi závisí na vybraném činidle.

Pro čpavek, který se využívá nejčastěji, může při nižších teplotách a nedostatečném promíchávání čpavku ve spalinách docházet k amoniakovému skluzu a tím jeho vysoké produkci následkem spalování, při vyšších teplotách k jeho oxidaci a následně vyšší tvorbě NO_x . [22]

5.3 Oxid siřičitý

Síra se vyskytuje v podstatě ve všech druzích tuhých paliv. Oxidy síry (SO_x) vznikají oxidací síry v palivu a jde o exotermní reakci. Síra je tedy hořlavinou a při spalování produkuje teplo. Síra z paliva se buď spálí, nebo zůstává v tuhých zbytcích jako nespalitelná část. Při vzniku SO_x vzniká z více než 95 % oxid siřičitý (SO_2) reakcí:



Reakcí s kyslíkem může vznikat i oxid sírový (SO_3):



Produkce SO_3 je při běžných spalovacích procesech velice nízká a pohybuje se maximálně na úrovni jednotek procent. V kontaktu s vlhkostí v atmosféře se chemickými reakcemi s vodou stávají z SO_3 aerosoly kyseliny sírové (H_2SO_4) a hydrogensíranu amonného (NH_4HSO_4). Množství vznikajícího SO_3 závisí na způsobu spalování a množství sirných látek, které obsahuje palivo. Část síry v palivu se navíc s kyslíkem nespojí a zůstává pak v popílku v podobě solí, jako je například síran draselný (K_2SO_4), nebo, při nižších teplotách a nedostatku kyslíku, sirovodík (H_2S). [14; 18; 23]

SO_x vypouštěné do ovzduší podporují skleníkový efekt a tvorbu aerosolu. Dále poškozují vegetaci, jelikož produkcí aerosolů, které se dostávají do srážek, podporují vznik kyselých dešťů ($\text{pH} < 4$) a smogu. Kyselé deště poškozují vegetaci, a jelikož z půdy uvolňují kadmium, měď a olovo, mají negativní vliv na vodu a mikroorganismy obsažené v půdě. SO_x korozivně působí na materiály a u lidí mají škodlivý efekt na dýchací cesty, což může způsobovat a zhoršovat astma a další onemocnění dýchacích cest. [14; 23]

Obsah SO_2 je u dřevní biomasy možné zanedbávat, jelikož se zde síra vyskytuje v tak minimálním množství, že téměř nedochází k produkci škodlivých látek vznikajících při jejím

spalování. U trávy a slámy je ale podíl síry významný a množství emisí, které vznikají při spalování těchto typů biomasy, je nutné redukovat. [14]

Jako opatření pro snižování emisí SO_2 je možné použít aditivní odsiřovací metodu. Jde o metodu využívající vápenec nebo dolomit jako aditivum, které je v průběhu spalování součástí fluidní vrstvy. Vlivem tepla je vápenec, nebo dolomit kalcinován a reakcí s SO_2 vzniká síran vápenatý. [2; 22]

Také je možné pro snižování emisí SO_2 použít procesy mokré vypírky, při kterých se používá vápno nebo vápenec. Dále se využívá polosuché aditivní vápencové metody. Při polosuché metodě je do spalin vstřikován hydroxid vápenatý ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) a odpařuje se voda. Odpařením vzniká suchý produkt, který je možné zachytávat filtry. Vyvinuty byly rovněž technologie spočívající v regeneraci použitého sorbentu. V praxi se ale uplatňují pouze výjimečně. [2]

5.4 Emise chloru

Chlor je žlutozelený, toxický a reaktivní plyn patřící do skupiny halogenů. Vzniká převážně při spalování odpadů, biomasy a hnědého uhlí. [18]

Část obsahu chloru v palivu je v podobě HCl a jeho solí jako jsou chlorid draselný (KCl) a chlorid sodný (NaCl). Ve dřevě je obsah chloru velmi malý, zatímco v trávě nebo v slámě je vyšší. Emise HCl vznikají uvolňováním chloridu z paliva, který při spalování reaguje s vodíkem. Reakcí s vodní parou dochází k uvolňování kyslíku a vzniku aerosolu kyseliny chlorovodíkové. [14; 22]

Chlor v plynném skupenství má dráždivé účinky a může způsobovat chronickou bronchitidu a rozedmu plic. Pro lidi je škodlivá koncentrace chloru vyšší než $2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ a pro vegetaci je chlor toxicitější než oxid siřičitý. [18]

Emise HCl způsobují kyselý dešť a korozi materiálů. Jako primární opatření ke snižování vznikajícího množství emisí HCl se používá vypírání paliva. Dále se množství emisí HCl snižuje sekundárními opatřeními, při nichž bývají využívány techniky určené zároveň i pro odsiřování spalin, jako je například polosuchá nebo mokrá vypírka. [14; 22]

5.5 Emise fluoru

Fluor je zelenožlutý, toxický a extrémně reaktivní plyn s dráždivým zápachem. V kapalné formě má žlutou barvu. Fluor působí na organismy i životní prostředí podobně jako chlor, ale je o něco agresivnější. V nízkých koncentracích může fluor způsobovat zažívací potíže, záněty spojivek, zápal dýchacích cest a edém plic, ve vyšších koncentracích může způsobit smrt. [18]

Emise HF vznikají převážně při spalování odpadů, biomasy a hnědého uhlí, kdy dochází k uvolnění fluoru z paliva a následnému sloučení s vodíkem. Vlivem vlhkosti vzduchu se z HF následně vytváří kyselina fluorovodíková. [18; 22]

Do atmosféry se sloučeniny fluoru dostávají antropogenní činností, například při výrobě fosfátů a hliníku. Při spalovacích procesech se většina fluoru obsaženého v palivu transformuje na HF. [18]

HF je plyn, při jehož nadýchání dochází k dýchacím problémům, zvracení a při kontaktu s kůží dochází k jejímu okamžitému poleptání. Dlouhodobý kontakt s HF způsobuje záněty dýchacích cest a poruchy krevního oběhu a krvetvorby. [18]

5.6 Polychlorované dibenzo-p-dioxiny a dibenzofurany

PCDD/F jsou látky, které se řadí mezi perzistentní organické polutanty (POP), což jsou látky zůstávající v prostředí v nezměněné formě po dlouhou dobu. Mají vysokou odolnost vůči rozkladu (chemickému, fotochemickému, termickému, biochemickému), čímž dochází k jejich koloběhu v prostředí a ke kumulaci v půdách, živých organismech a sedimentech. [18; 23; 24]

Vznik PCDD/F je vedlejším produktem antropogenních procesů a dochází k němu převážně při neúplném spalování paliv obsahujících chlor. Množství měrných emisí PCDD/F vznikajících při těchto termických procesech je závislé na obsahu chloru v palivu. Jedná se zejména o procesy zahrnující spalování odpadů z potravin, plastů, papírů, metalurgické procesy a další chemické procesy. Vytvářejí se zejména katalytickými reakcemi uhlíku nebo jeho sloučenin s oxidy kovů, popřípadě anorganickými sloučeninami chloru, obvykle

při teplotách v rozsahu 200 – 450 °C. Po spalování odpadu se vyskytují převážně v popílku, ve kterém nejčastěji dochází k reakcím potřebným pro vznik PCDD/F, a ze kterého se za běžných fyzikálních podmínek prostředí postupně vypařují. [18; 22; 23; 24]

PCDD/F jsou vysoce toxické látky, které mají mimo jiné karcinogenní, teratogenní a mutagenní účinky na živé organismy. Jsou perzistentní a váží se na buňky, čímž mohou poškozovat například játra, periferní nervy nebo zhoršovat schopnost metabolismu tuků. [18; 23]

5.7 Tuhé znečišťující látky

TZL jsou tuhé částice o různém složení a velikosti 0,1 – 500 μm , které proudí ve spalinách. Základním údajem pro stanovení granulometrie TZL je velikost částic, z něhož se následně určuje zastoupení různých velikostí částic. [18; 23]

K vzniku TZL dochází převážně z minerální části obsažené v palivu v průběhu spalování. Část TZL může sestávat také z malých částic, které vzniknou v průběhu spalování kondenzací odpařovaných sloučenin, nebo z nevyhořelého uhlíku. [22]

Škodlivost TZL spočívá ve výskytu stopového množství těžkých kovů vyskytujících se v popelovině. TZL mohou být také v podobě aerosolů, které mohou následně kontaminovat ovzduší a půdu. Nejvíce nebezpečné jsou částice o velikosti 0,25 – 5 μm . Ty mohou být zadržovány v plicích a mají tak škodlivý vliv na lidské zdraví. [18; 23]

6 Experimentální část

V této části diplomové práce jsou nejprve představena jednotlivá měřící zařízení, která byla k měření využívána a následně je zde popsána měřící trasa fluidního kotle s bublinkující fluidní vrstvou. Vysvětlena byla také metodika vyhodnocování plynných emisí naměřených v průběhu experimentů.

Pro experimentální část byly použity tři druhy paliv a to dřevní pelety, slunečnicové pelety a pelety z obilných plev. Pro tato paliva bylo naměřeno šest různých stavů, které se odlišují použitými teplotami při spalování ve fluidní vrstvě a odlišným množstvím přebytku vzduchu při spalování.

6.1 Popis měřících přístrojů

Pro měření CO_2 , CO , SO_2 a NO_x byl použit infračervený analyzátor (NDIR, z angl. Nondispersive Infrared Sensor) od výrobce Hartman & Braun – URAS 10 E, který je možné vidět na Obr. 4. NDIR analyzátor funguje na principu měření emisí pomocí nedisperzní infračervené absorpce. Koncentrace kyslíku byla měřena paramagneticky analyzátozem PMA 12 od výrobce M&C.

Měření bylo prováděno pomocí odběrové sondy s keramickým filtrem instalované v proudu spalin, odkud spaliny proudily vyhřívanou trubicí, aby nedocházelo k jejich kondenzaci. Řízená kondenzace spalin je umístěna na vstupu do analyzátoru a spaliny jsou analyzovány v suchém stavu.



Obr. 4: NDIR analyzátor [25]

Dalším použitým přístrojem byl analyzátor využívající infračervenou spektrometrii s Fourierovou transformací (FTIR, z angl. Fourier transform infrared) DX 4000, od firmy Gaset. Pomocí tohoto přístroje byly měřeny emise hydridů chloru a fluoru. Spektrometr pracuje při teplotách 200 °C a proto nebyla v měřící trase zařazena chladicí aparatura.

6.2 Popis experimentálního zařízení

Experimenty byly prováděny na experimentální fluidní jednotce s bublinkující fluidní vrstvou umístěné v laboratořích Ústavu Energetiky. Zařízení má tepelný výkon 30 kW a jeho schematické znázornění je uvedeno na Obr. 5.

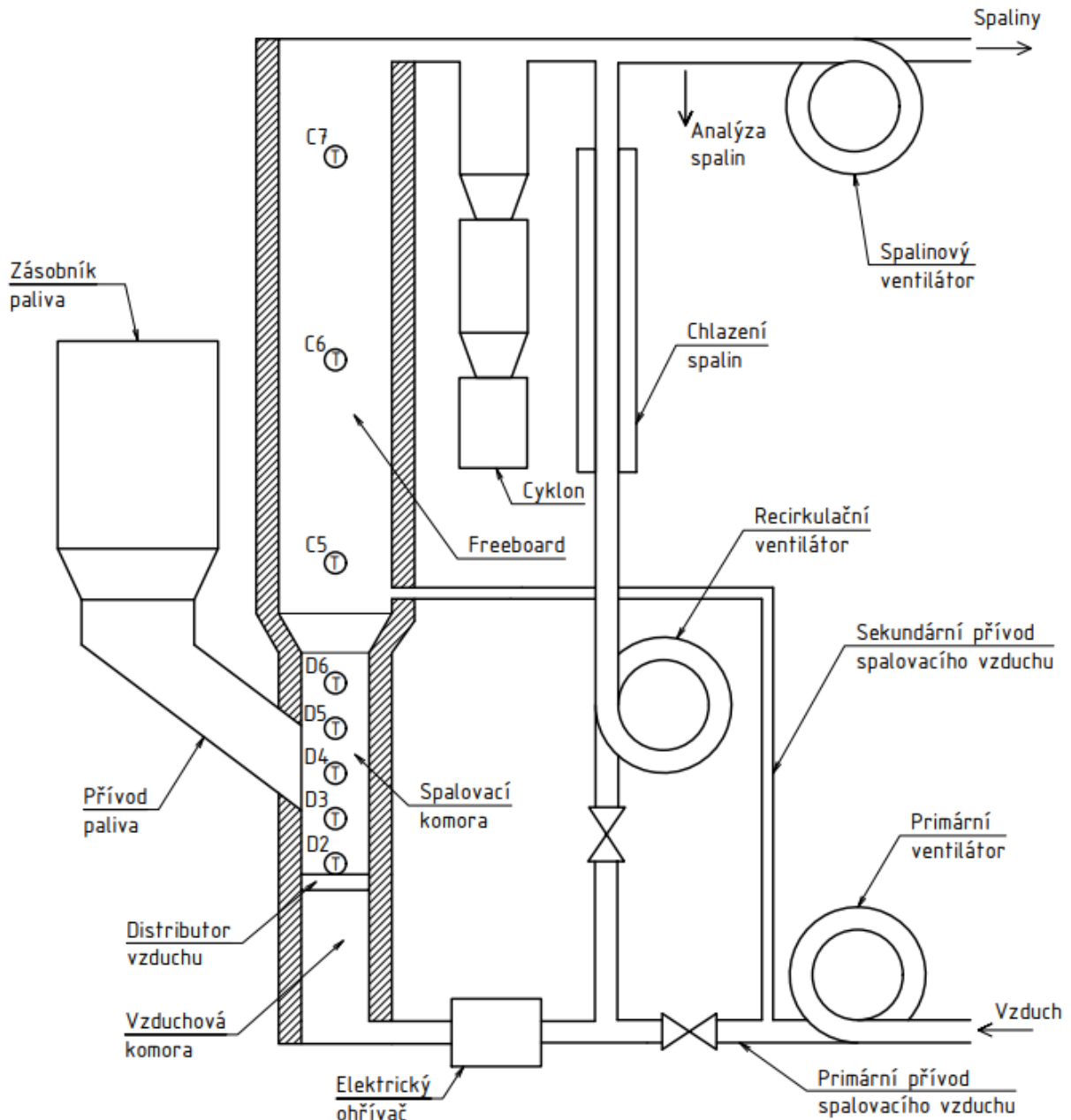
Vzduch je přes primární ventilátor vháněn do zařízení, kde se dle potřeby může dále dělit na primární a sekundární spalovací vzduch. Primární spalovací vzduch jde do vzduchové komory přes elektrický ohříváč, který slouží pro startování zařízení. Díky němu se zvyšuje teplota primárního vzduchu a nahřívá se tak fluidní vrstva na požadovanou teplotu pro počátek hoření paliva. Ze vzduchové komory proudí vzduch přes distributor složený z kloboučků do spalovací komory a dochází tak k profukování (proublávání) fluidní vrstvy. Sekundární spalovací vzduch je pak možné přivádět do freeboardu (dohořivací části) pro lepší dohořívání uvolněné prchavé hořlaviny.

Do spalovací komory je také zaveden přívod paliva. Palivo je ze zásobníku dopravováno přes šnekový dopravník do fluidní vrstvy. Přívod množství paliva je možné řídit dobou chodu a dobou prodlevy dopravníku. Palivo je tak dávkováno do spalovací komory v intervalech nastavených pro vhodný průběh spalování.

Ze spalovací komory proudí vzniklé spaliny do freeboardu. Ten má pro snížení rychlosti spalin, a tím jejich delšímu setrvání ve freeboardu, rozšířený průřez. Následně spaliny vstupují do cyklónu, který z nich odlučuje popílek, a spalinovým ventilátorem jsou vháněny do komína.

Před spalinovým ventilátorem je potrubí, které je možné použít pro recirkulaci spalin, čímž je možné regulovat teplotu fluidní vrstvy. Recirkulované spaliny jsou chlazeny a recirkulačním ventilátorem vháněny do potrubí, které se následně slučuje s potrubím s přívodem primárního spalovacího vzduchu.

Před spalínovým ventilátorem je také umístěna odběrová sonda pro možnost následné analýzy spalin (viz kapitola 6.1).



Obr. 5: Schéma experimentální trasy [26]

Jednotka je osazena řadou termočlánků, umístěných ve spalovací komoře a freeboardu, umožňujících měřit teplotní profil po celé výšce spalovací komory (viz Obr. 5, kde jsou jednotlivé termočlánky označeny písmenem T). Vzdálenosti jednotlivých termočlánků od dna distributoru jsou uvedeny v Tab. 6.

Tab. 7: Výška jednotlivých termočlánků ve spalovací komoře od dna distributoru

Termočlánek	D2	D3	D4	D5	D6	C5	C6	C7
Výška od dna distributoru [mm]	24	124	224	324	424	690	1140	1590

6.3 Použité materiály

Pro experimentální část práce byla využita tři paliva ve formě pelet. Konkrétně se jednalo o dřevní pelety nejvyšší kvality A1, vyrobené z měkkého smrkového dřeva bez přídavku kůry (Obr. 6), pelety ze slunečnice, respektive slunečnicových slupek a zbytků po lisování oleje (Obr. 7) a pelety z obilných plev a posklizňových zbytků (Obr. 8). Pelety ze dřeva a z plev měly průměr 6 mm a délku 15 – 35 mm. Pelety ze slunečnice měly průměr 8 mm a délku v rozmezí 20 – 35 mm. Hrubá a prvková analýza paliv je shrnuta v Tab. 8.

Tab. 8: Hrubá a prvková analýza paliv

Palivo	Výhřevnost [MJ · kg ⁻¹]	C^{daf} [%]	H^{daf} [%]	N^{daf} [%]	S^{daf} [%]	O^{daf} [%]	Cl^{daf} [%]	W^r [%]	A^r [%]
Dřevěné pelety	16,40	51,0	6,90	0,30	0,003	41,8	–	7,8	1,5
Slunečnicové pelety	18,56	54,8	6,96	1,32	0,11	36,8	0,0062	6,7	3,5
Pelety z obilných plev	14,26	47,7	7,78	2,19	0,16	42,1	0,16	14,5	4,9


Obr. 6: Pelety ze smrkového dřeva

Obr. 7: Pelety ze slunečnicových slupek

Obr. 8: Pelety z obilných plev

6.4 Charakteristika inertního materiálu

Vzhledem k faktu, že vybraná paliva obsahují jen velice malé množství popela, který je navíc velice jemný, bylo nezbytné využít jako inertní materiál fluidní vrstvy křemičitý písek (Obr. 9). Základní fyzikální vlastnosti písku jsou uvedeny v Tab. 9. Jedná se o písek z lomu Střeleč s označením ST 01/06. Rozměry částic jsou v rozmezí od 0,1 do 0,6 mm. Písek je charakteristický rovněž chemickým složením, kdy 99 hm. % tvoří oxid křemičitý.

Tab. 9: Charakteristika inertního materiálu - písku

Hustota ρ_s [kg · m ⁻³]	Sypná hmotnost ρ_b [kg · m ⁻³]	Střední průměr částic d_{mean} [mm]	Nejčastější průměr částic d_{mode} [mm]	Mezerovitost ε [-]	Sféricita φ [-]
2650	1520	0,41	0,38	0,42	0,8



Obr. 9: Křemičitý písek

6.5 Metodika měření

Experiment zahrnoval šest měření pro každé palivo. Pro vhodné sledování vlivu teploty byly využity tři stavy a to v rozmezí teplot mezi 800 – 900 °C, při koncentraci kyslíku ve spalinách 8 %. Pro porovnání rozdílů produkce emisí při změnách přebytku vzduchu byly měřeny opět tři stavy s koncentrací kyslíku ve spalinách mezi 4 – 12 % při teplotě

kolem 850 °C. Dále byl měřen stav se stupňovitým přívodem spalovacího vzduchu pro určení vlivu sekundárního vzduchu. Matici měření je možné vidět v Tab. 10, kde jsou měřené stavy označeny jako X. Není zde zahrnut stav s měřením stupňovitého přívodu vzduchu.

Měření pro jednotlivé stavy probíhalo za ustálených podmínek po dobu minimálně 30 minut. Požadované hodnoty teplot a koncentrace kyslíku se v měřeních mírně odlišují, jelikož ve skutečnosti není možné přesně naladit průběh spalování na požadované hodnoty. Byla snaha udržovat teploty fluidní vrstvy v rozmezí ± 10 °C od požadované teploty a ± 1 % od požadované koncentrace kyslíku ve spalínách. V naměřených experimentálních hodnotách tedy může vznikat mírná odchylka oproti ideálním požadovaným hodnotám.

Tab. 10: Matice měření

Matice měření	Požadovaná teplota [°C]	800	850	900
Koncentrace kyslíku ve spalínách [%]				
4		-	X	-
8		X	X	X
12		-	X	-

Data pro plynné emise SO_2 , NO_x , CO , HCl a HF byla měřena v jednotkách ppm (z angl. parts per million). Plyny CO_2 a O_2 byly měřeny v procentech. Bylo tedy nutné provést přepočítání z ppm na $\text{mg} \cdot \text{m}_N^{-3}$, který je uveden níže, pro získání hmotnostních koncentrací jednotlivých emisních látek. Vzorec rovněž obsahuje část pro přepočítání na referenční obsah kyslíku, nezbytný pro porovnání mezi jednotlivými stavy.

Výpočet hmotnostní koncentrace jednotlivých znečišťujících látek (φ_x [ppm]) je konkrétní měřená koncentrace jednotlivých emisních látek, p_N normální tlak o hodnotě 101 325 Pa, M_x [$\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$] molekulová hmotnost, $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ univerzální plynová konstanta, T_N normální teplota o hodnotě 273,15 K, $O_{2,ref}$ referenční koncentrace kyslíku o hodnotě 11 % a $O_{2,meas}$ [%] měřená koncentrace kyslíku):

$$\rho_x = \varphi_x \cdot \frac{p_N \cdot M_x}{R \cdot T_N} \cdot \frac{21 - O_{2,ref}}{21 - O_{2,meas}} \text{ [mg} \cdot \text{m}_N^{-3}] \quad (6.1)$$

Dále byly emise přepočteny na emisní faktor podle [27], který lze definovat jako množství vyprodukované emisní látky vztažené například na hmotnost paliva, výhřevnost paliva nebo výstupní výkon. Tyto rovnice předpokládají kompletní spalování. Pokud toho není docíleno, může vznikat chyba do 5 %.

Z prvkového množství původního vzorku (r) paliva byl proveden výpočet měrného objemu spalovacího vzduchu V_{CA} :

$$V_{CA} = (1,864 \cdot C^r + 5,554 \cdot H^r + 0,698 \cdot S^r - 0,700 \cdot O^r) \cdot \frac{1}{0,21} [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.2)$$

Dále byl pro výpočet měrného objemu spalin proveden z procentuální hodnoty měřeného kyslíku $O_{2,meas}$ výpočet množství přebytečného spalovacího vzduchu λ :

$$\lambda = \frac{21}{21 - O_{2,meas}} [-] \quad (6.3)$$

Pro výpočet emisního faktoru vztaženého na hmotnost spalného tepla byl proveden výpočet měrného objemu spalin V_{FG} :

$$V_{FG} = 1,855 \cdot C^r + 0,0003 \cdot V_{CA} \cdot \lambda + 0,800 \cdot N^r + 0,683 \cdot S^r + \quad (6.4)$$

$$+ 0,7805 \cdot V_{CA} \cdot \lambda + 0,0091 \cdot V_{CA} \cdot \lambda + 0,21 \cdot (\lambda - 1) \cdot V_{CA} [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Z výsledků předchozích vzorců lze dále vypočítat emisní faktor vztažený na hmotnost paliva EF_{mass}^X (ρ_m^X [mg/m_N^3]) je hmotnostní koncentrace jednotlivých znečišťujících látek bez přepočtu na referenční kyslík a index X určuje jednotlivé druhy emisí):

$$EF_{mass}^X = V_{FG} \cdot \rho_m^X [\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.5)$$

Výpočet emisního faktoru vztaženého na výhřevnost paliva EF_{LHV}^X (LHV [$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$] je výhřevnost paliva):

$$EF_{LHV}^X = \frac{EF_{mass}^X}{LHV} [\text{g} \cdot \text{GJ}^{-1}] \quad (6.6)$$

6.6 Konverzní faktor N-NO_x

Konverzní faktor je definován jako procentuální poměr koncentrace emisí NO_x na teoreticky možnou maximální koncentraci emisí NO_x, které by mohly vznikat z dusíku vázaného v palivu. Definice konverzního faktoru také předpokládá, že veškeré NO_x jsou tvořeny z dusíku vázaného v palivu. [28]

Objem NO₂ ve spalínách se vypočte podle následující rovnice (jeden mol plynné látky odpovídá objemu 22,4 dm³, molární hmotnost dusíku je rovna hodnotě 14 a N^r je obsah dusíku v původním vzorku paliva):

$$V_{NO_2} = \frac{22,4}{14} \cdot N^r \quad [\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.7)$$

Maximální koncentrace NO_x ve spalínách, které by bylo dosaženo při 100 % konverzi dusíku obsaženého v palivu, se vypočítá podle následující rovnice:

$$\varphi_{NO_x(max)} = \frac{V_{NO_2}}{V_{FG}} \quad [-] \quad (6.8)$$

Konverzní faktor se vypočítá jako poměr koncentrace NO_x ve spalínách převedené z ppm a maximální koncentrace NO_x ve spalínách podle rovnice:

$$X_{NO_x} = \frac{\varphi_{NO_x}}{\varphi_{NO_x(max)}} \quad [-] \quad (6.9)$$

7 Průběh a vyhodnocení experimentálního měření

Experimentální měření probíhalo v celkem osmnácti stavech na experimentální jednotce fluidního kotle v laboratoři Juliska, přičemž pro každé ze tří použitých paliv – tedy pelet ze smrkového dřeva, slunečnicových slupek a obilných plev bylo měřeno šest různých stavů. Experiment byl prováděn při použití bublinkující fluidní vrstvy a písku jako inertního materiálu.

7.1 Vliv teploty fluidní vrstvy

Prvním sledovaným parametrem ovlivňujícím spalovací proces je teplota fluidní vrstvy. V Tab. 11 jsou shrnuty výsledky z měření emisí právě v závislosti na tomto parametru. Je patrné, že ve všech stavech se podařilo nastavit teplotu fluidní vrstvy v intervalu ± 10 °C od požadované teploty. Rovněž koncentraci kyslíku ve spalinách se pro většinu stavů podařilo držet na úrovni $8\% \pm 1\%$, kromě dvou stavů pro měření s plevy, kdy měření bylo více rozkolísané, a průměrná hodnota kyslíku ve spalinách stoupla nad 9 %. Dále jsou v Tab. 12 shrnuty výsledky pro emisní faktor vztažený jak na hmotnost paliva, tak na výhřevnost.

Tab. 11: Vliv teploty ve fluidní vrstvě na tvorbu emisí v průběhu spalování při požadované koncentraci kyslíku okolo 8 %

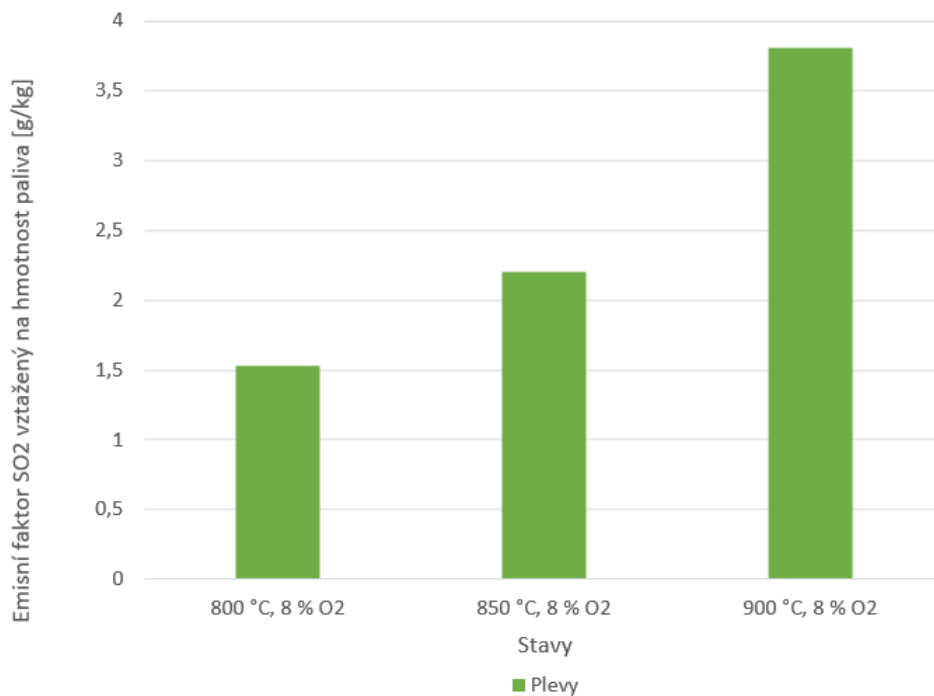
Palivo	Požadovaná teplota [°C]	Skutečná teplota [°C]	O ₂ [%]	CO ₂ [%]	SO ₂ [$\frac{mg}{m^3_N}$]	CO [$\frac{mg}{m^3_N}$]	NO _x [$\frac{mg}{m^3_N}$]
Pelety ze smrkového dřeva	800	797 ± 6,2	8,2 ± 0,8	12,3 ± 0,7	NA	43,7 ± 5,4	116 ± 7,2
	850	855 ± 3,7	7,5 ± 1,7	12,7 ± 0,6	NA	56,1 ± 11,4	109 ± 11,3
	900	890 ± 3,8	8,1 ± 0,5	11,6 ± 0,5	NA	46,7 ± 2,7	107 ± 5,5
Pelety ze slunečnicových slupek	800	796 ± 2,8	8,5 ± 0,6	11,1 ± 0,7	NA	803,4 ± 129,8	667 ± 34,9
	850	851 ± 5,4	7,2 ± 0,7	12,3 ± 0,6	NA	121,5 ± 50,2	567 ± 33,1
	900	900 ± 3,4	7,7 ± 0,6	12,1 ± 0,7	NA	124,9 ± 34,1	526 ± 33,4
Pelety z obilných plev	800	794 ± 4,6	9,7 ± 1,0	10,7 ± 1,0	187 ± 21,8	36,5 ± 9,6	806 ± 67,1
	850	841 ± 3,1	9,4 ± 0,4	10,3 ± 0,4	269 ± 13,9	46,3 ± 2,0	708 ± 27,9
	900	903 ± 3,8	8,0 ± 0,6	12,1 ± 0,6	467 ± 80,9	24,3 ± 2,7	615 ± 64,7

Tab. 12: Vliv teploty fluidní vrstvy na emisní faktory

Palivo	Požadovaná teplota [°C]	EF_{mass}^X [mg · kg ⁻¹]			EF_{LHV}^X [g · GJ ⁻¹]		
		SO ₂	CO	NO _x	SO ₂	CO	NO _x
Pelety ze smrkového dřeva	800	NA	0,41	1,08	NA	24,89	66,08
	850	NA	0,52	1,02	NA	31,89	62,22
	900	NA	0,44	1,00	NA	26,61	60,75
Pelety ze slunečnicových slupek	800	NA	8,19	6,80	NA	441,41	366,47
	850	NA	1,24	5,78	NA	66,64	311,29
	900	NA	1,27	5,36	NA	68,55	288,76
Pelety z obilných plev	800	1,53	0,30	6,58	107,03	20,89	461,50
	850	2,20	0,41	5,78	154,42	28,58	405,15
	900	3,80	0,20	5,01	266,70	13,90	351,42

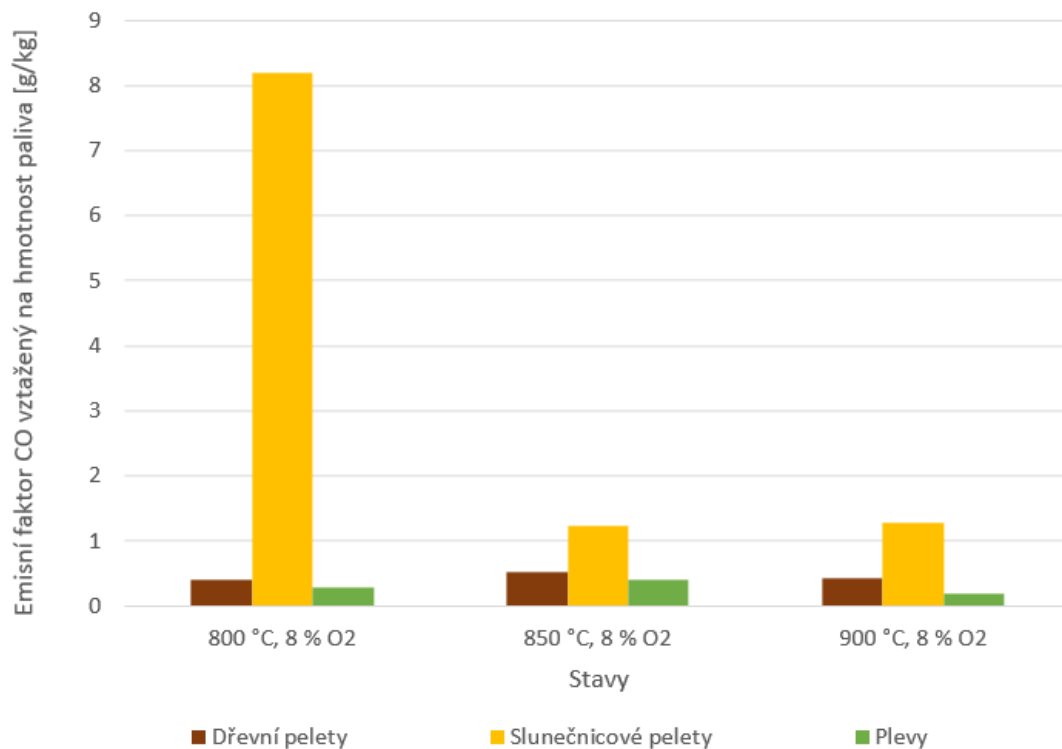
Koncentrace emisí SO₂ byly relevantní pouze v případě měření s peletami z obilných plev. V tabulkách nejsou uváděny hodnoty naměřených emisí SO₂ pro pelety ze smrkového dřeva a slunečnicových pelet, jelikož se jednalo pouze o jednotky ppm a naměřené hodnoty se pohybovaly na úrovni chyby měření analyzátoru. V tabulkách je pro tyto stavy použito označení NA (z angl. Not Available). V případě pelet ze smrkového dřeva je minimum emisí SO₂ očekávatelné z důvodu velmi nízkého obsahu síry v palivu. V případě pelet ze slunečnice je ale výsledek poměrně překvapivý, jelikož podle rozboru paliva je obsah síry řádově na stejné hodnotě jako v případě obilných plev. Z pozorování při měření se ukázalo, že emise SO₂ byly po většinu času měření velice nízké a na hraně měřitelnosti. V krátkých časových úsecích a také při startu měření ale docházelo k mírnému zvýšení koncentrací. Síra tedy může být v tomto palivu obsažena velice nerovnoměrně, případně je možné, že byl velmi efektně vzniklý SO₂ vázán v průběhu spalování na popel.

V grafu 1 lze pozorovat teplotní závislost při spalování pelet z obilných plev na emise SO₂, kde s rostoucí teplotou jejich množství stoupá.



Graf 1: Vliv teploty na emisní faktor SO₂ vztažený na hmotnost paliva

V grafu 2 lze vidět vliv teploty na emisní faktor CO vztažený na hmotnost paliva. Nejvíce patrný byl vliv teploty při použití pelet ze slunečnicových slupek jako paliva. V tomto případě bylo množství emisí CO nejvyšší při nízkých teplotách, kdy nedocházelo k dobrému dohořívání paliva. Při vyšších teplotách, kdy tento problém již nenastával, je emisní faktor téměř konstantní. Zároveň je z grafu 2 a Tab. 11 a Tab. 12 patrné, že v případě pelet ze smrkového dřeva a obilných plev je vliv teploty na množství emisí CO i emisní faktory minimální. Z důvodu menšího množství prchavé hořlaviny obsažené v těchto palivech je produkce emisí CO nižší a CO tedy lépe dohořívá i při teplotách okolo 800 °C.

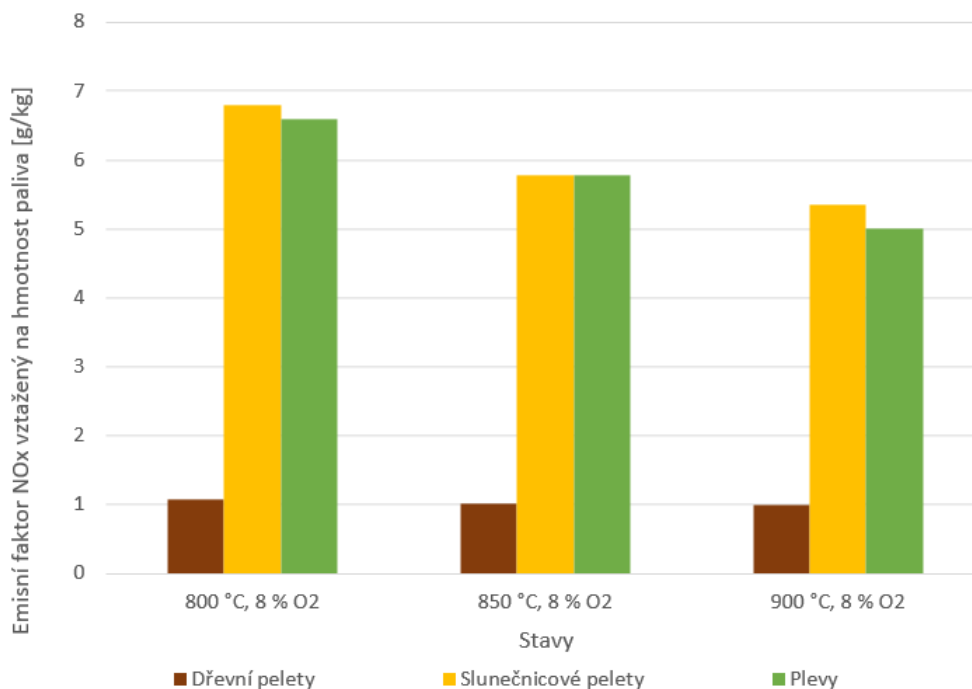


Graf 2: Vliv teploty na emisní faktor CO vztažený na hmotnost paliva

Z Tab. 11 je možné posoudit chování tvorby NO_x při spalování. Je jasně patrný vliv množství dusíku v palivu na tvorbu NO_x, kterých je nejméně při spalování pelet ze smrkového dřeva, kde je dusíku vázaného v hořlavině pouhých 0,3 %. U pelet z obilných plev, kde je množství dusíku obsaženého v hořlavině nejvyšší, je vidět výrazný nárůst produkce NO_x v průběhu spalování.

Při přepočtu výsledků na emisní faktor NO_x vztažený na hmotnost paliva je vliv teploty vidět v grafu 3. Nejmenší emisní faktor je dle očekávání při spalování pelet ze smrkového dřeva. Nejvyšší je u pelet ze slunečnicových slupek, které mají vyšší výhřevnost než pelety z obilných plev a pro požadovanou teplotu je třeba hmotnostně méně paliva. To ovlivňuje hodnoty emisního faktoru vztaženého na hmotnost paliva, jelikož zde vliv výhřevnosti není zohledněn. V případě emisního faktoru vztaženého na výhřevnost mají nejvyšší hodnotu dle očekávání pelety z obilných plev.

Z grafu a tabulek je také možné zaznamenat, že celkově při vyšších teplotách množství emisí NO_x a jejich emisní faktory klesají. Teploty v průběhu spalování biomasy jsou navíc dostatečně nízké pro to, aby nedocházelo k vyššímu vzniku termických NO_x .

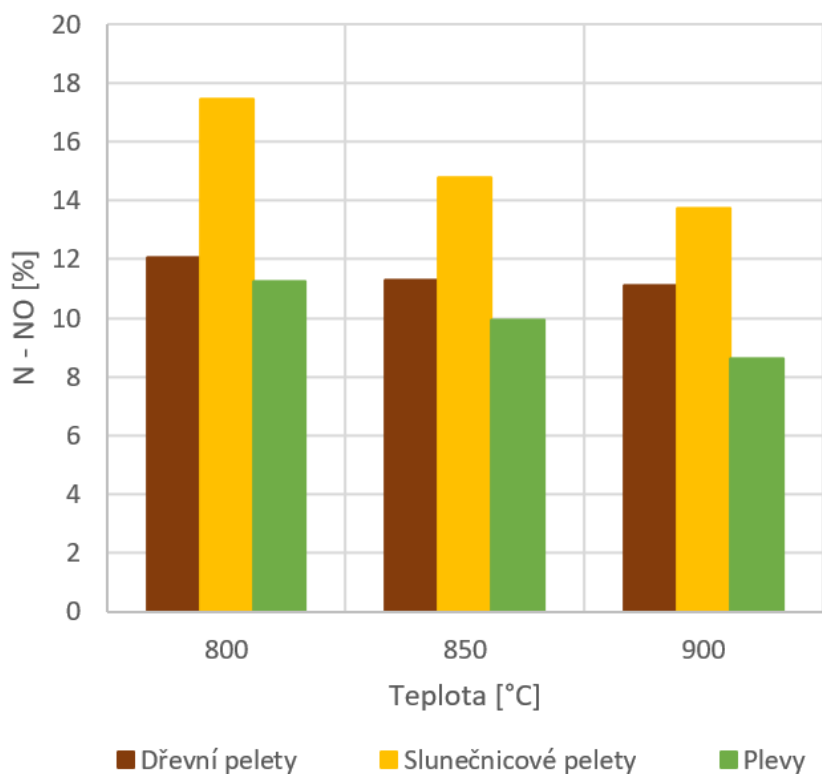


Graf 3: Vliv teploty na emisní faktor NO_x vztahovaný na hmotnost paliva

Aby bylo možné lépe zohlednit vliv vzniku emisí NO_x z dusíku obsaženého v palivu, je navíc dopočítán konverzní faktor NO_x . V tabulce 13 lze vidět vyhodnocení vlivu teploty na konverzní faktor NO_x , kde je určeno procentuální množství dusíku vázaného v palivu, které bylo spalováním přeměněno na NO_x . Dále je možné v grafu 4 pozorovat, že velikost konverzního faktoru s vyšší teplotou klesá, což znamená, že množství palivových NO_x se s vyšší teplotou snižuje. Také je možné pozorovat, že nejvyšší konverzní faktor mají slunečnicové pelety, nejmenší pak pelety z obilných plev. Nízký konverzní faktor v případě plev výrazně snižuje množství produkovaných NO_x . I přes to, že má toto palivo téměř dvojnásobné množství dusíku vázaného v hořlavině, než pelety ze slunečnicových slupek, dochází díky nízkému konverznímu faktoru k výraznému omezení produkce NO_x . Množství produkovaných emisí NO_x se tak v případě těchto dvou paliv pohybuje na podobných hodnotách.

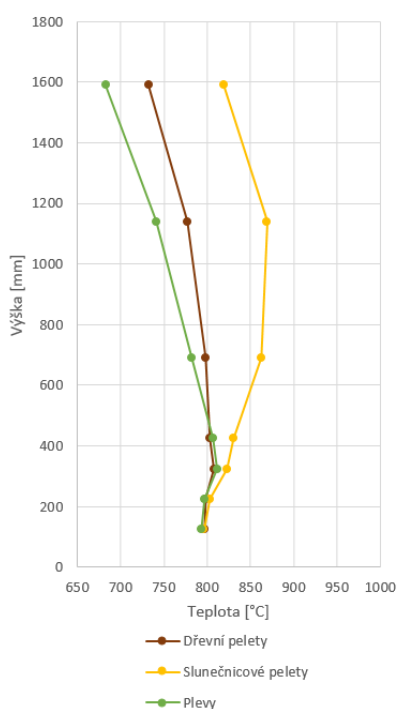
Tab. 13: Vliv teploty na konverzní faktor NO_x

Palivo	Pelety ze smrkového dřeva		Pelety ze slunečnicových slupek		Pelety z obilných plev	
	Požadovaná teplota [°C]	Skutečná teplota [°C]	X_{NO_x} [%]	Skutečná teplota [°C]	X_{NO_x} [%]	Skutečná teplota [°C]
800	797,25 ± 6,21	12,08	796,18 ± 2,76	17,43	793,81 ± 4,57	11,25
850	855,30 ± 3,70	11,28	833,84 ± 14,65	14,80	837,23 ± 5,19	9,93
900	889,69 ± 3,76	11,13	899,69 ± 3,42	13,73	902,73 ± 3,79	8,60

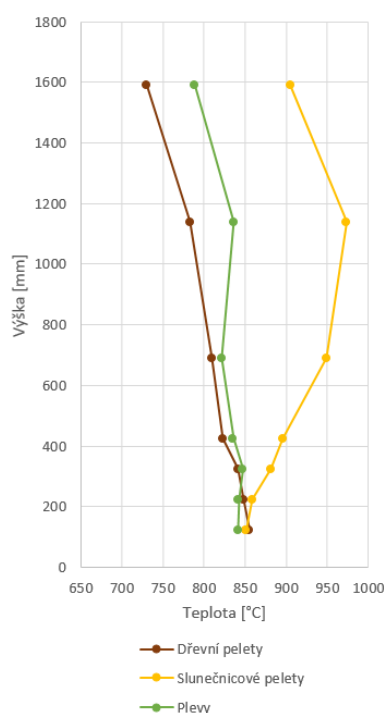

Graf 4: Vliv teploty na konverzní faktor N - NO

Vliv teploty fluidní vrstvy na teplotní profil ve spalovací komoře

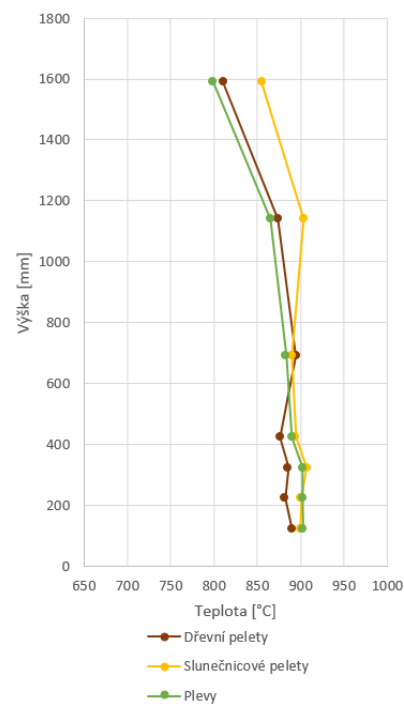
Na grafech 5, 6 a 7 lze vidět porovnání průběhu teplotních profilů tří stavů pro jednotlivá paliva s ohledem na vliv teploty a při přibližně stejné koncentraci kyslíku ve spalinách. Při spalování pelet ze smrkového dřeva i z obilných plev pravděpodobně dochází k vyhořívání již ve fluidní vrstvě a teplota ve freeboardu postupně klesá. K výraznějšímu nárůstu teploty ve freeboardu dochází při spalování pelet ze slunečnicových slupek, které mají pravděpodobně vyšší podíl prchavé hořlaviny uvolňující se z paliva. Také je patrné, že teplota ve freeboardu výrazněji narůstá při nižších teplotách ve fluidní vrstvě. Při teplotě fluidní vrstvy o hodnotě 900 °C je tato teplota dostatečná pro intenzivní dohořívání slunečnicového paliva a ve freeboardu tak nedochází k nárůstu teploty jako při použití nižších teplot. V případě využití teplot kolem 900 °C se tak teplotní profily pro všechna paliva více vyrovnávají.



Graf 5: Teplotní profil 800 °C,
8 % O₂



Graf 6: Teplotní profil 850 °C,
8 % O₂



Graf 7: Teplotní profil 900 °C,
8 % O₂

7.2 Vliv přebytku spalovacího vzduchu

Dalším sledovaným parametrem ovlivňující spalování je vliv přebytku spalovacího vzduchu. Byl posuzován pro tři úrovně koncentrace kyslíku ve spalinách o hodnotách 4, 8 a 12 %. Teplota fluidní vrstvy byla pro všechny měření držena na úrovni kolem 850 °C. Výsledky měření emisí jsou shrnuty v Tab. 14, kdy byla držena teplota fluidní vrstvy v rozmezí ± 10 °C od požadovaných 850 °C a koncentrace kyslíku v intervalu ± 1 % od požadovaných hodnot. V Tab. 15 jsou pak uvedeny výsledky, kdy bylo uvedené množství jednotlivých znečišťujících látek přepočteno na emisní faktory vztažené na hmotnost a výhřevnost paliva.

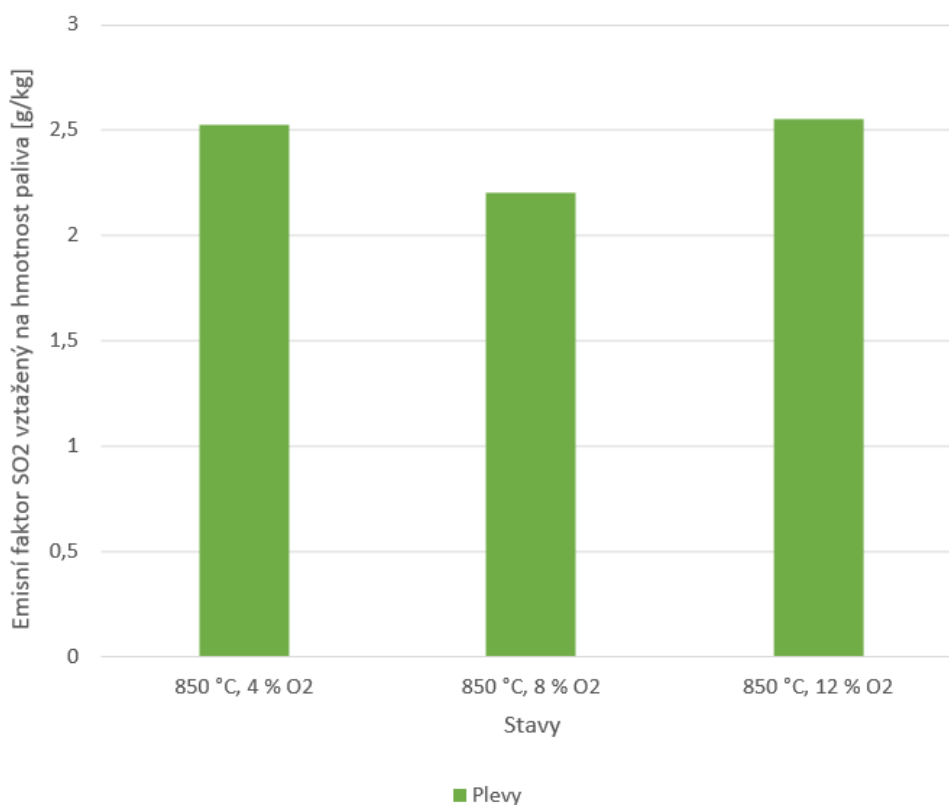
Tab. 14: Vliv koncentrace kyslíku ve spalinách na tvorbu emisí v průběhu spalování při teplotách fluidní vrstvy okolo 850 °C

Palivo	O_2 (požad.) [%]	O_2 (skut.) [%]	Teplota [°C]	CO_2 [%]	SO_2 $\left[\frac{mg}{m^3_N}\right]$	CO $\left[\frac{mg}{m^3_N}\right]$	NO_x $\left[\frac{mg}{m^3_N}\right]$
Pelety ze smrkového dřeva	4	3,6 $\pm 0,8$	856 $\pm 3,4$	17,1 $\pm 0,8$	NA	38,2 $\pm 12,3$	92 $\pm 4,7$
	8	7,5 $\pm 1,7$	855 $\pm 3,7$	12,7 $\pm 0,6$	NA	56,1 $\pm 11,4$	109 $\pm 11,3$
	12	11,6 $\pm 0,7$	851 $\pm 6,0$	8,6 $\pm 0,6$	NA	55,3 $\pm 8,3$	114 $\pm 9,1$
Pelety ze slunečnicových slupek	4	4,0 $\pm 0,7$	849 $\pm 7,5$	15,6 $\pm 0,7$	NA	1052,0 $\pm 294,5$	309 $\pm 28,5$
	8	7,2 $\pm 0,7$	851 $\pm 5,4$	12,3 $\pm 0,6$	NA	121,5 $\pm 50,2$	567 $\pm 33,1$
	12	11,7 $\pm 0,6$	844 $\pm 9,7$	7,9 $\pm 0,6$	NA	259,0 $\pm 78,0$	674 $\pm 64,7$
Pelety z obilných plev	4	4,3 $\pm 0,7$	850 $\pm 4,5$	15,8 $\pm 0,7$	311 $\pm 28,2$	50,2 $\pm 20,1$	382 $\pm 42,6$
	8	9,4 $\pm 0,4$	841 $\pm 3,1$	10,3 $\pm 0,4$	269 $\pm 13,9$	46,3 $\pm 2,0$	708 $\pm 27,9$
	12	11,3 $\pm 0,5$	849 $\pm 6,6$	8,7 $\pm 0,5$	312 $\pm 39,3$	39,7 $\pm 3,8$	755 $\pm 47,6$

Tab. 15: Vliv koncentrace kyslíku na emisní faktory

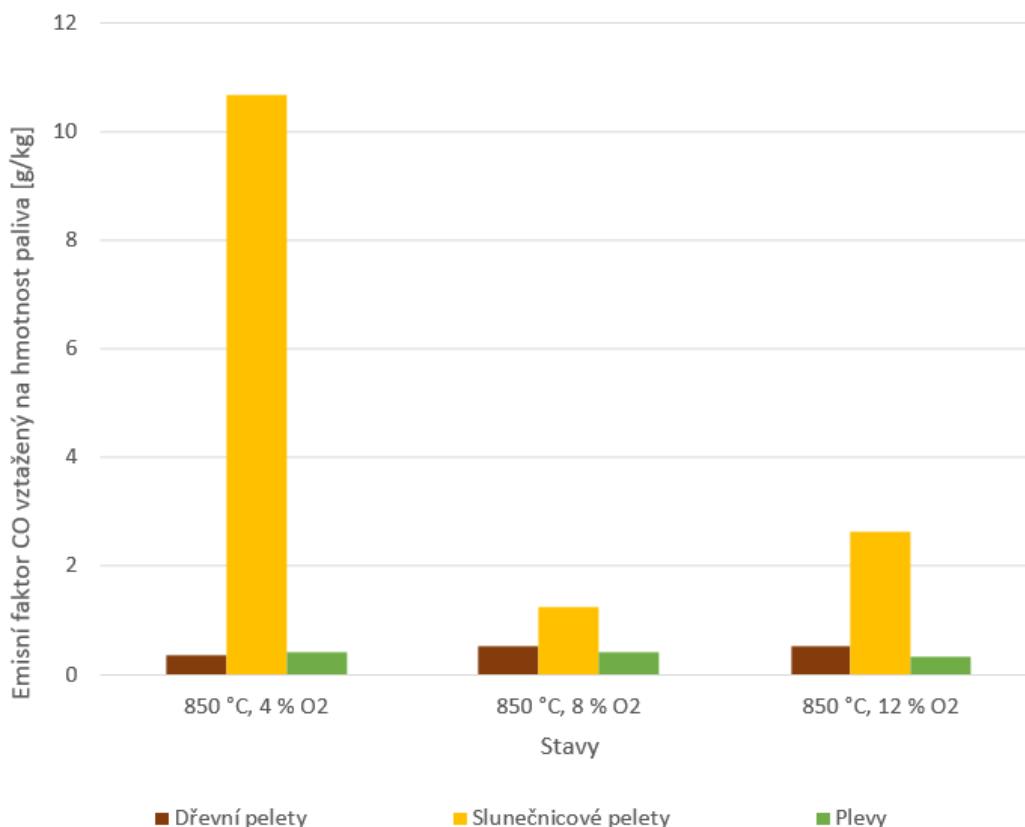
Palivo	O_2 (požad.) [%]	EF_{mass}^X [mg · kg ⁻¹]			EF_{LHV}^X [g · GJ ⁻¹]		
		SO_2	CO	NO_x	SO_2	CO	NO_x
Pelety ze smrkového dřeva	4	NA	0,36	0,85	NA	21,68	52,13
	8	NA	0,52	1,02	NA	31,89	62,22
	12	NA	0,52	1,07	NA	31,54	65,15
Pelety ze slunečnicových slupek	4	NA	10,68	3,13	NA	575,18	168,70
	8	NA	1,24	5,78	NA	66,64	311,29
	12	NA	2,65	6,89	NA	142,77	371,43
Pelety z obilných plev	4	2,53	0,41	3,10	177,22	28,56	217,63
	8	2,20	0,41	5,78	154,42	28,58	405,15
	12	2,55	0,33	6,18	178,97	22,80	433,21

V grafu 8 lze pozorovat vliv přebytku spalovacího vzduchu na emisní faktor SO_2 při použití pelet z obilných plev jako paliva. Z grafu i tabulek je možné pozorovat, že vliv přebytku vzduchu na množství emisí SO_2 je minimální. Mírný pokles je patrný při teplotě 850 °C, což může být způsobeno částečným záchytem SO_2 na popel paliva. 850 °C je optimální teplotou pro potenciální záchyt SO_2



Graf 8: Vliv koncentrace kyslíku ve spalínách na emisní faktor SO₂ vztahovaný na hmotnost paliva

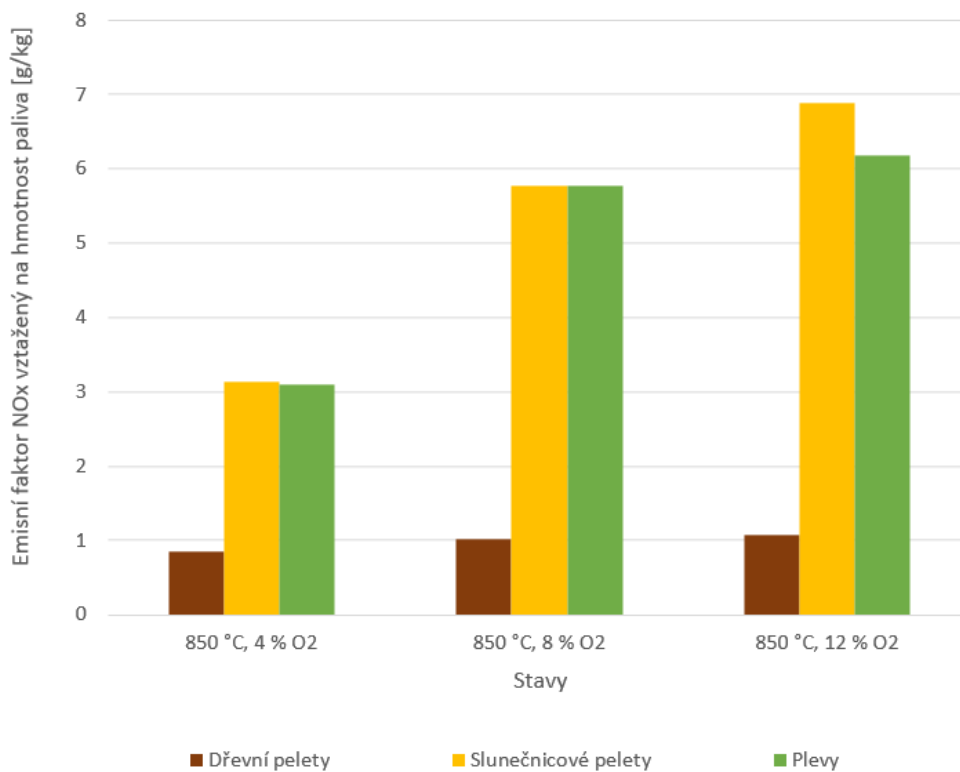
Graf 9 porovnává vlivu přebytku vzduchu na emisní faktor CO vztahovaný na hmotnost paliva. Závislost množství emisí CO na koncentraci kyslíku byla nejvíce patrná při spalování pelet ze slunečnicových slupek, kdy docházelo k vyšší produkci CO při koncentraci kyslíku snížené na 4 %. Je zde vidět vliv lokálních nedostatků kyslíku ve fluidní vrstvě při spalování paliva, kdy dochází k menší míře oxidace CO na CO₂ a jeho produkce pak výrazně narůstá. Zároveň je z grafu a výše uvedených tabulek patrné, že v případě pelet ze smrkového dřeva a obilných plev je vliv přebytku spalovacího vzduchu na množství emisí CO i emisní faktory z provedených měření minimální. To může být opět z důvodu vyššího množství prchavé hořlaviny obsažené v slunečnicových peletách, kdy při použití nižší koncentrace kyslíku nedochází k tak intenzivnímu spalování ve fluidní vrstvě.



Graf 9: Vliv koncentrace kyslíku ve spalinách na emisní faktor CO vztažený na hmotnost paliva

Z výše uvedených tabulek je možné zaznamenat závislost koncentrace kyslíku ve spalinách na produkci emisí NO_x, kdy jsou nejnižší hodnoty emisního faktoru při nízké koncentraci kyslíku ve spalinách a s jeho rostoucím množstvím se emisní faktor zvyšuje. Stejnou závislost lze vyčíst i z grafu 10.

Nejnižší hodnoty emisního faktoru vztaženého na hmotnost paliva jsou dle očekávání pro pelety ze smrkového dřeva, které obsahují nejméně dusíku vázaného v hořlavině. K nejvýraznější závislosti přebytku vzduchu na růst NO_x dochází u pelet ze slunečnicových slupek. Při 12 % obsahu kyslíku ve spalinách dokonce převyšují produkci NO_x u emisí produkovaných peletami z obilných plev, kde je obsah dusíku obsažený v palivu výrazně vyšší. To je pravděpodobně opět způsobeno větším množstvím prchavé hořlaviny v případě použití slunečnicových pelet. Emisní faktor vztažený na výhřevnost je pak opět nejvyšší pro pelety z obilných plev, což souvisí s jejich nižší výhřevností.

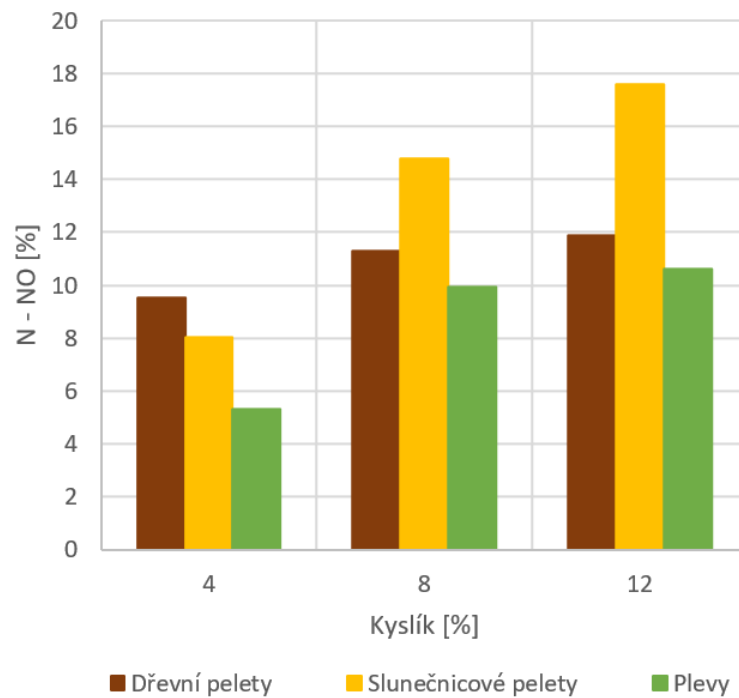


Graf 10: Vliv koncentrace kyslíku ve spalinách na emisní faktor NO_x vztažený na hmotnost paliva

V Tab. 16 lze vidět vyhodnocení vlivu přebytku vzduchu na konverzní faktor NO_x , kdy je možné určit vliv narůstající koncentrace kyslíku na rostoucí hodnotu konverzního faktoru, čímž je způsobena vyšší tvorba palivových NO_x . To je patrné také z grafu 11. Lze vidět, že při koncentraci kyslíku o hodnotě 4 % mají nejvyšší konverzní faktor pelety ze smrkového dřeva, které ale s narůstající koncentrací kyslíku nemají tak výrazný nárůst konverzního faktoru jako slunečnicové pelety. Pro pelety ze slunečnicových slupek dochází s rostoucí koncentrací kyslíku ze 4 % na 12 % ke zvýšení konverzního faktoru více než dvojnásobně. Toto palivo tak vykazuje nejhorší vlastnosti z hlediska přeměny dusíku vázaného v palivu na tvorbu palivových NO_x . U pelet z obilných plev hodnota konverzního faktoru stoupá při zvyšování koncentrace kyslíku ve spalinách výrazněji než u smrkových pelet, ale o něco pomaleji než u slunečnicových pelet. Vzhledem k vyšší koncentraci dusíku v tomto palivu je ale stále podíl produkovaných emisí tímto palivem nejvyšší, i přes jeho nejnižší hodnoty konverzního faktoru.

Tab. 16: Vliv koncentrace kyslíku ve spalínách na konverzní faktor NO_x

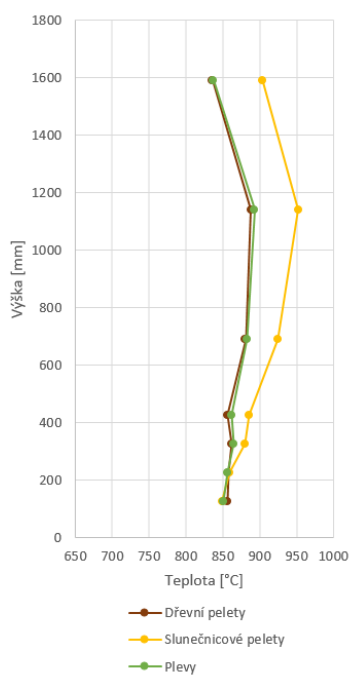
Palivo	Pelety ze smrkového dřeva		Pelety ze slunečnicových slupek		Pelety z obilných plev		
	O_2 (požadované) [%]	O_2 (skut) [%]	X_{NO_x} [%]	O_2 (skut) [%]	X_{NO_x} [%]	O_2 (skut) [%]	X_{NO_x} [%]
4		$3,58 \pm 0,79$	9,55	$4,00 \pm 0,69$	8,03	$4,30 \pm 0,71$	5,32
8		$7,45 \pm 1,65$	11,28	$7,34 \pm 0,85$	14,80	$9,61 \pm 0,48$	9,93
12		$11,57 \pm 0,67$	11,90	$11,69 \pm 0,64$	17,60	$11,34 \pm 0,52$	10,60



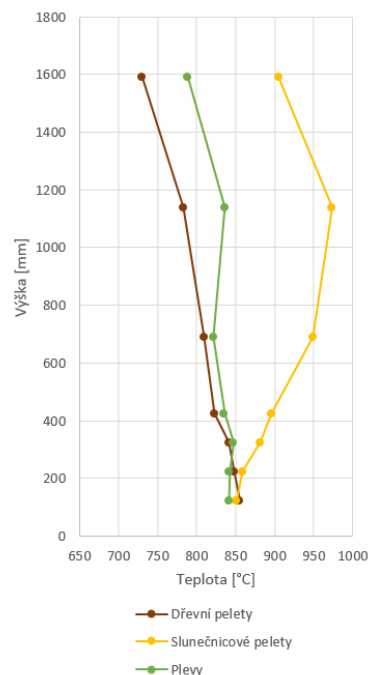
Graf 11: Vliv koncentrace kyslíku ve spalínách na konverzní faktor N - NO

Vliv přebytku spalovacího vzduchu na teplotní profil ve spalovací komoře

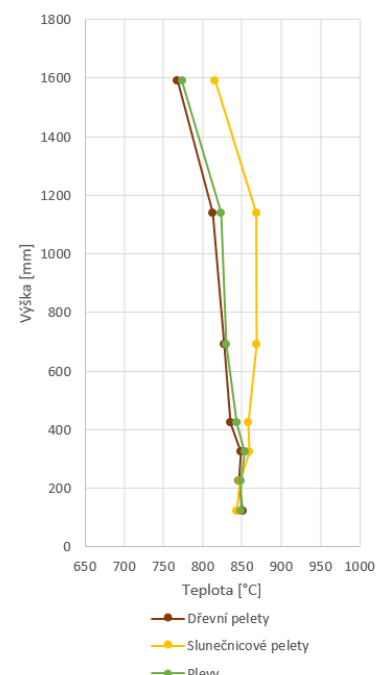
V grafech 12, 13 a 14 lze vidět srovnání průběhů teplotních profilů pro jednotlivé stavy za použití rozdílných koncentrací kyslíku ve spalinách a při teplotě fluidní vrstvy kolem 850 °C. Z porovnání obrázků je jasně patrné, že v případě spalování s malým přebytkem vzduchu je spalování méně intenzivní a všechna paliva dohořívají až ve freeboardu, kde se uvolňuje více tepla. Pro slunečnici je tento vliv nejzřetelnější. V případě koncentrace kyslíku na úrovni 8 % ve spalinách už pelety ze dřeva a plev hoří intenzivněji ve vrstvě a teploty po výšce spalovací komory rovnoměrně klesají. V případě slunečnice tento jev neplatí a i v tomto stavu dochází k intenzivnímu dospalování až ve freeboardu. Právě vysoké teploty ve freeboardu ovšem výrazně přispěly ke snížení koncentrace CO, která je pro tento stav nejnižší. V případě použití nejvyššího přebytku vzduchu se teplotní profily pro všechna paliva více vyrovnávají. K nejintenzivnějšímu spalování dochází ve fluidní vrstvě a i v případě slunečnice je nárůst teplot ve freeboardu již minimální.



Graf 12: Teplotní profil 850 °C,
4 % O₂



Graf 13: Teplotní profil 850 °C,
8 % O₂



Graf 14: Teplotní profil 850 °C,
12 % O₂

7.3 Vliv stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu

V Tab. 17 lze vidět porovnání mezi spalováním se stupňovitým přívodem spalovacího vzduchu a stavem o podobných parametrech spalování bez použití stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu na tvorbu uvedených emisních látek. Uvedené stavy mezi sebou mají odchylku pro teplotu v intervalu do ± 10 °C a pro koncentraci kyslíku do ± 1 %. Výjimkou jsou slunečnicové pelety, kdy jsou hodnoty rozdílů mezi teplotami a kyslíkem u jednotlivých stavů o něco vyšší. V Tab. 18 je pak shrnutí emisních faktorů, vypočtených z měřených koncentrací emisí.

Z důvodu softwarových chyb při ukládání dat nebylo možné určit přesný poměr primárního a sekundárního vzduchu u využití stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu. Tento poměr je tedy možné přibližně určit z nastavení ventilátoru na hodnotu 0,3 primárního ku sekundárnímu vzduchu.

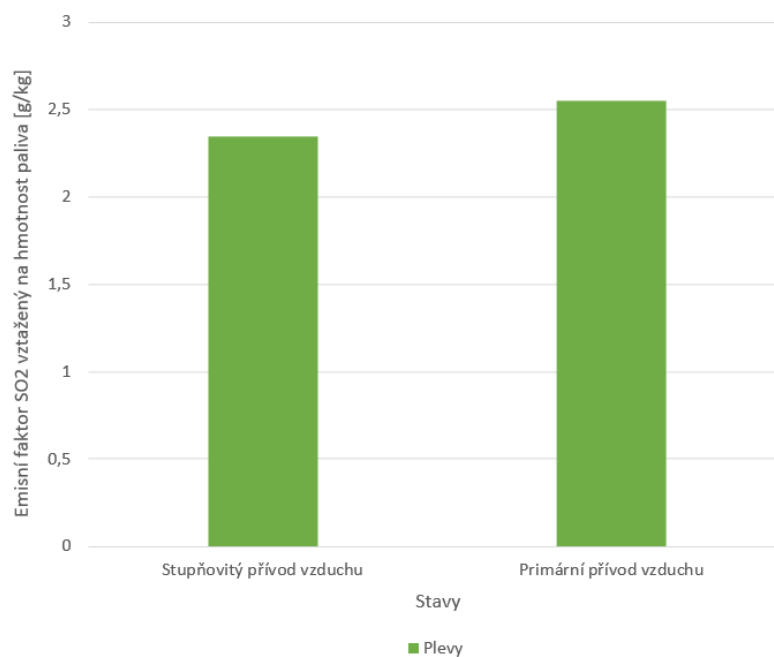
Tab. 17: Vliv stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu (SPSV) na tvorbu emisí v průběhu spalování v porovnání se spalováním s přívodem pouze primárního přívodu spalovacího vzduchu (PPSV)

Palivo	Spalovací vzduch	O_2 [%]	Teplota [°C]	CO_2 [%]	SO_2 $\left[\frac{mg}{m^3_N}\right]$	CO $\left[\frac{mg}{m^3_N}\right]$	NO_x $\left[\frac{mg}{m^3_N}\right]$
Pelety ze smrkového dřeva	SPSV	7,9 $\pm 0,5$	897 $\pm 12,0$	11,7 $\pm 0,5$	NA	67,7 $\pm 6,6$	99 $\pm 4,8$
	PPSV	8,1 $\pm 0,5$	890 $\pm 3,8$	11,6 $\pm 0,5$	NA	46,7 $\pm 2,7$	107 $\pm 5,5$
Pelety ze slunečnicových slupek	SPSV	9,0 $\pm 0,7$	887 $\pm 4,2$	10,3 $\pm 0,6$	NA	101,2 $\pm 23,2$	557 $\pm 34,5$
	PPSV	7,7 $\pm 0,6$	900 $\pm 3,4$	12,1 $\pm 0,7$	NA	124,9 $\pm 34,1$	526 $\pm 33,4$
Pelety z obilných plev	SPSV	10,5 $\pm 0,5$	854 $\pm 4,4$	9,0 $\pm 0,5$	287 $\pm 15,4$	68,0 $\pm 5,6$	714 $\pm 33,3$
	PPSV	11,3 $\pm 0,5$	849 $\pm 6,6$	8,7 $\pm 0,5$	312 $\pm 39,3$	39,7 $\pm 3,8$	755 $\pm 47,6$

Tab. 18: Vliv stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu na emisní faktory

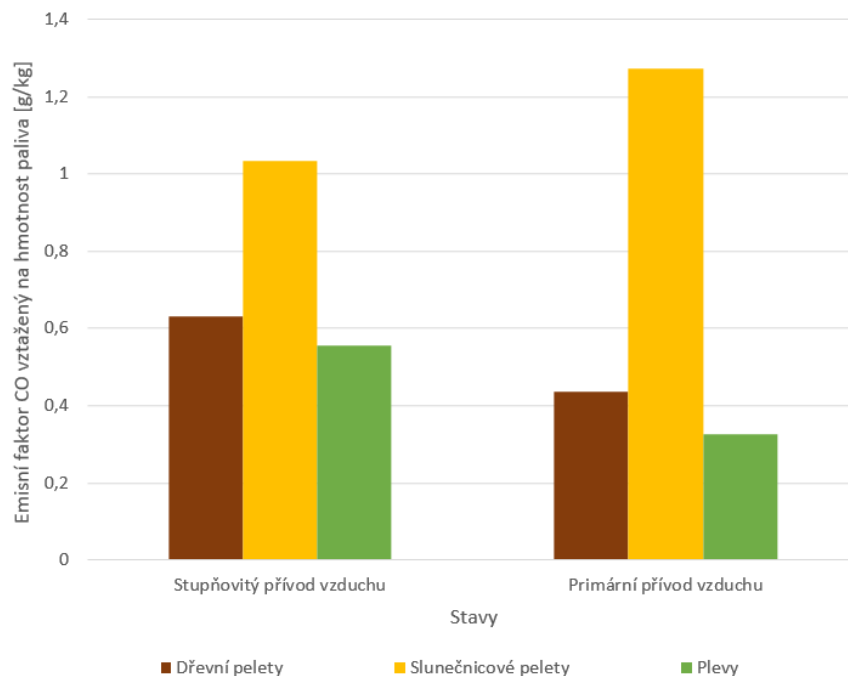
Palivo	Spalovací vzduch	EF_{mass}^X [mg · kg ⁻¹]			EF_{LHV}^X [g · GJ ⁻¹]		
		SO ₂	CO	NO _x	SO ₂	CO	NO _x
Pelety ze smrkového dřeva	SPSV	NA	0,63	0,93	NA	38,5	56,53
	PPSV	NA	0,44	1,00	NA	26,61	60,75
Pelety ze slunečnicových slupek	SPSV	NA	1,03	5,69	NA	55,65	306,34
	PPSV	NA	1,27	5,36	NA	68,55	288,76
Pelety z obilných plev	SPSV	2,34	0,56	5,84	164,33	38,96	409,62
	PPSV	2,55	0,33	6,18	178,97	22,80	433,21

Graf 15 ukazuje vliv využití stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu na velikost emisního faktoru SO₂ vztáženého na hmotnost paliva pro pelety z obilných plev. Z grafu i Tab. 17 a Tab. 18 je patrné, že využití stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu oproti pouze primárnímu spalovacímu vzduchu na tvorbu emisí SO₂ nemá výraznější vliv.



Graf 15: Vliv stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu na emisní faktor SO₂ vztážený na hmotnost paliva

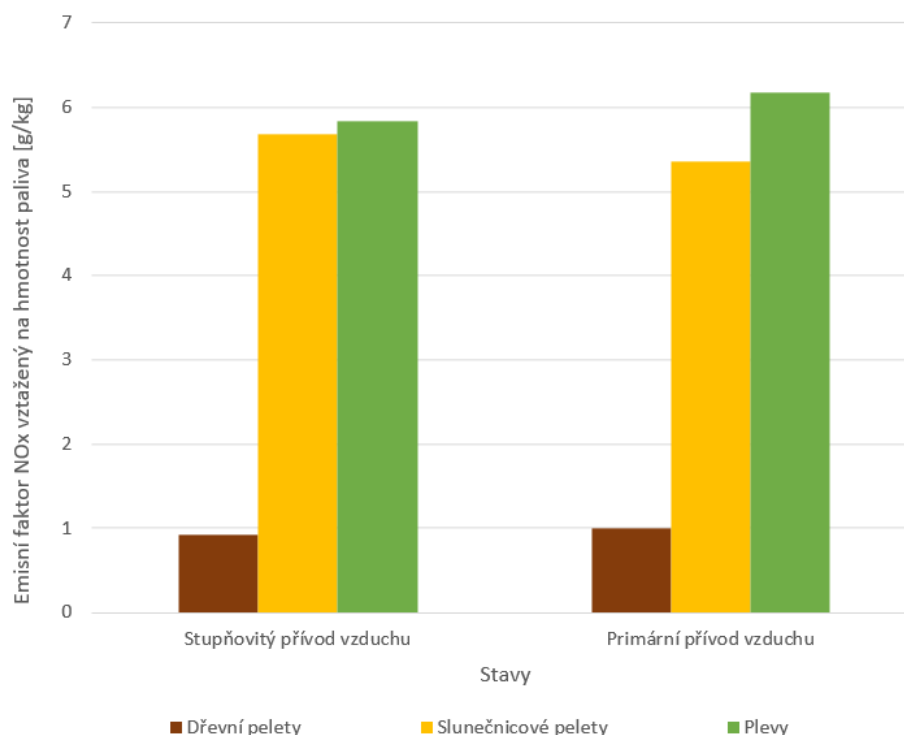
Podle grafu 16 má použití stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu oproti využití pouze primárního spalovacího vzduchu největší vliv na snižování množství CO u slunečnicových pelet. Při použití pelet ze smrkového dřeva nebo obilných plev emisní faktor i množství emisí CO při použití stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu naopak vzrostli. To mohlo být zapříčiněno odlišnými hodnotami koncentrace kyslíku ve spalinách v průběhu měření. Také je možné, že použitím sekundárního vzduchu došlo k ochlazení spalin, což zapříčinilo nedostatečnou teplotu pro dohořívání CO ve freeboardu a tím i k nárůstu emisí CO pro dřevní a obilné pelety.



Graf 16: Vliv stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu na emisní faktor CO vztažený na hmotnost paliva

V grafu 17 lze vidět porovnání emisního faktoru NO_x pro měření s přívodem stupňovitého spalovacího vzduchu a s přívodem pouze primárního vzduchu. Z grafu, i výše uvedených tabulek, lze určit, že použití stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu mělo v průběhu měření na tvorbu emisí NO_x minimální vliv, i přes to, že stupňovitý přívod spalovacího vzduchu se používá jako jedno z primárních opatření pro snižování tvorby emisí NO_x . Pro pelety ze smrkového dřeva a obilných plev došlo k malému vzrůstu hmotnostní koncentrace NO_x ve spalinách při použití stupňovitého přívodu vzduchu. Při přepočtu

na emisní faktor vztahovaný na hmotnost paliva i na výhřevnost ale dochází k drobnému poklesu obou emisních faktorů. U slunečnicových pelet dochází k opačnému efektu, kdy sice množství hmotnostní koncentrace emisí NO_x ve spalinách mírně klesá, ale při přepočtu na emisní faktory byly jejich hodnoty pro stav s použitím stupňovitého přívodu o něco vyšší, i přes použití tohoto opatření.

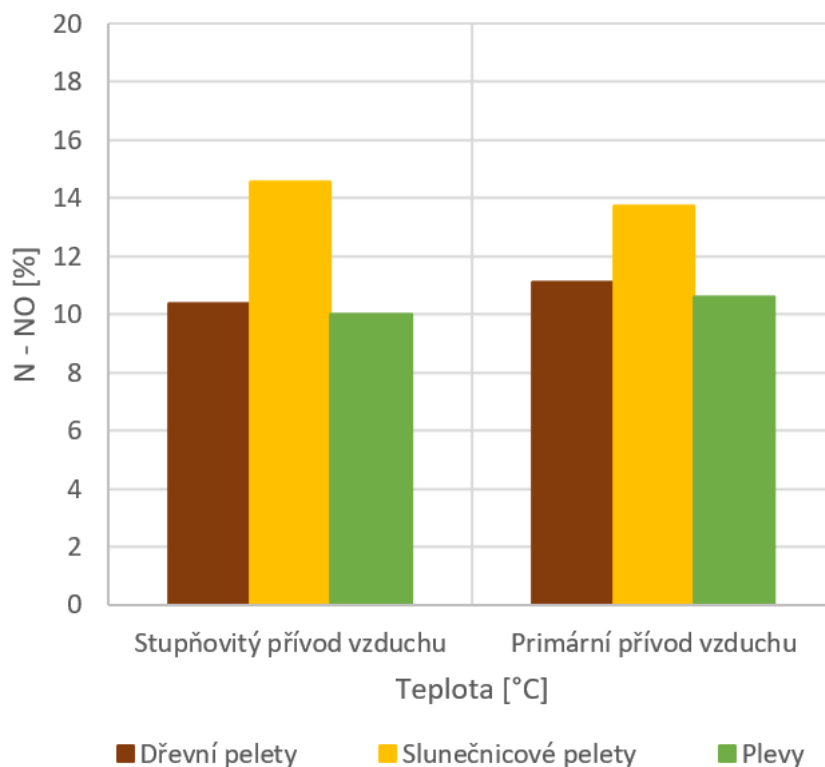


Graf 17: Vliv stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu na emisní faktor NO_x vztahovaný na hmotnost paliva

V Tab. 19 a grafu 18 lze vidět vyhodnocení vlivu stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu na konverzní faktor NO_x . V případě pelet ze smrkového dřeva jsou hodnoty konverzního faktoru při použití stupňovitého přívodu vzduchu o něco nižší, než při použití pouze primárního spalovacího vzduchu. To stejné platí i pro pelety z obilných plev. K opačné situaci dochází u slunečnicových pelet, kdy konverzní faktor s použitím stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu mírně narůstá, což pravděpodobně souvisí i s vyššími emisními faktory v případě spalování tohoto paliva.

Tab. 19: Vliv stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu na konverzní faktor NO_x

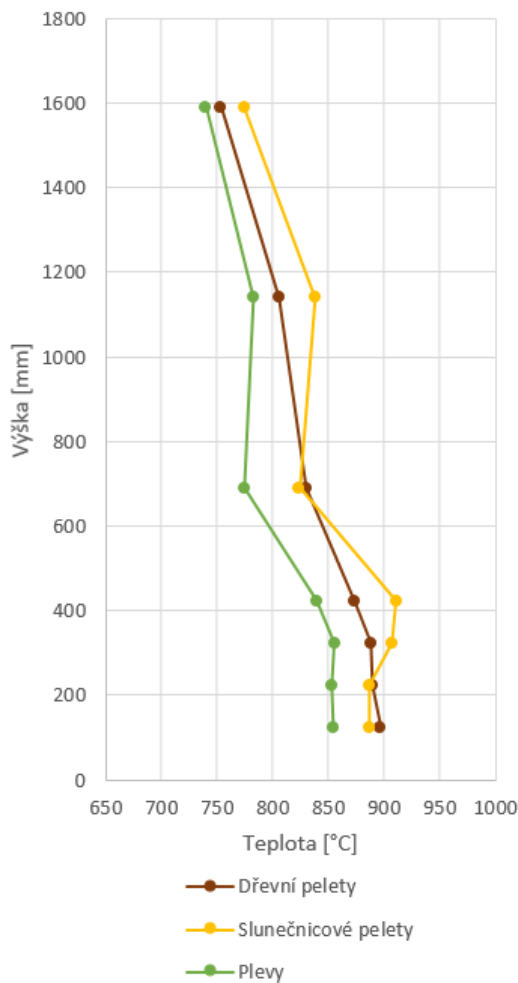
Palivo	Pelety ze smrkového dřeva			Pelety ze slunečnicových slupek			Pelety z obilných plev		
	O_2 [%]	Teplota [°C]	X_{NO_x} [%]	O_2 [%]	Teplota [°C]	X_{NO_x} [%]	O_2 [%]	Teplota [°C]	X_{NO_x} [%]
SPSV	7,9 ± 0,5	897 ± 12,0	10,36	9,0 ± 0,7	887 ± 4,2	14,56	10,5 ± 0,5	854 ± 4,4	10,03
PPSV	8,1 ± 0,5	890 ± 3,8	11,13	7,7 ± 0,6	900 ± 3,4	13,73	11,3 ± 0,5	849 ± 6,6	10,60


Graf 18: Vliv stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu na konverzní faktor N - NO

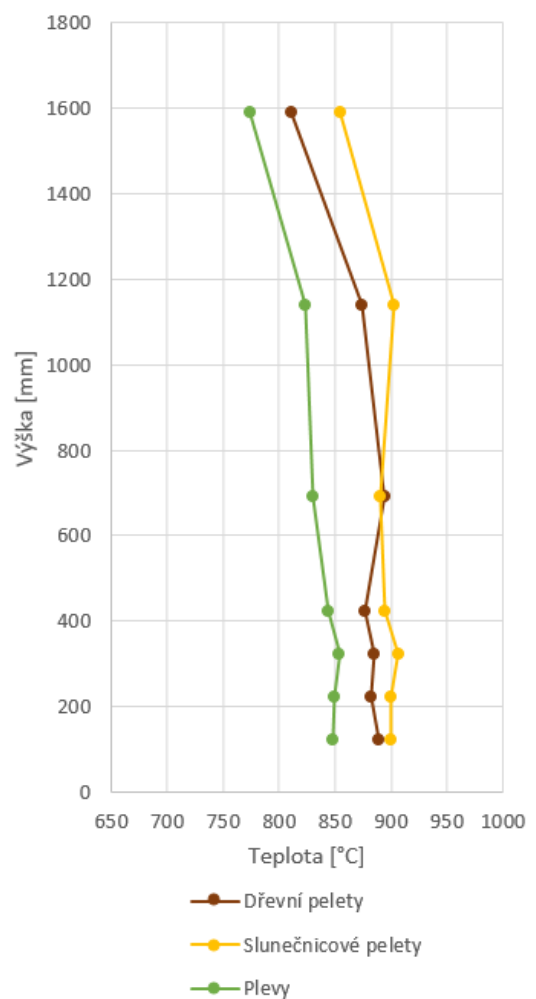
Vliv stupňovitého přívodu vzduchu na teplotní profil ve spalovací komoře

V grafech 19 a 20 lze vidět porovnání teplotních profilů mezi stupňovitým přívodem spalovacího vzduchu a stavem s použitím pouze primárního spalovacího vzduchu o podobných parametrech spalování. Ve srovnání s ostatními teplotními profily lze u využití stupňovitého

přívodu spalovacího vzduchu zaznamenat pokles teploty v místě zaústění sekundárního vzduchu do spalovací komory. Z důvodu dohořívání CO pak teploty mírně vzrostou. Díky této závislosti je pro spalování slunečnicových pelet možné omezení produkce CO při spalování se stupňovitým přívodem vzduchu. Pro pelety ze smrkového dřeva a obliných plev není tento vliv tak výrazný, což je pravděpodobně způsobeno dostatečným dohořením CO již ve fluidní vrstvě.



Graf 19: Teplotní profil – Stupňovitý přívod vzduchu



Graf 20: Teplotní profil – Primární přívod spalovacího vzduchu

7.4 Chlorovodík a fluorovodík

Množství emisí HCl a HF lze vidět v Tab. 17. Největší množství emisí HCl bylo naměřeno pro spalování pelet z obilných plev, kde je ho zároveň nejvíce obsaženo v palivu. Jelikož z prvkové analýzy není známé množství chloru v peletách ze smrkového dřeva, nelze přímo zhodnotit vliv množství chloru v původním vzorku na produkci HCl pro toto palivo. Je tedy možné, že u pelet ze smrkového dřeva bylo v palivu větší množství chloru, než u pelet ze slunečnice a proto je množství emisí HCl v tomto případě vyšší. Pro všechna tři paliva také chybí prvková analýza pro fluory. Jelikož emise HF vznikají při spalování navázáním fluoru uvolněného z paliva na vodík, je pravděpodobné, že největší množství fluoru bylo v peletách ze smrkového dřeva, nejmenší pak v slunečnicových peletách.

HCl a HF mají tendenci vázat se na popelovinu. U pelet ze slunečnice byla v průběhu měření zaznamenána největší produkce popílku. Existuje tedy možnost, že množství emisí HCl a HF je u slunečnicových pelet nižší, než u zbývajících dvou paliv právě z důvodu navázání těchto plynných emisních látek na popílek ve spalínách, i přes to, že v tomto palivu mohlo být původně vyšší množství chloru a fluoru.

Tab. 20: Množství hmotnostní koncentrace emisí HCl a HF ve spalínách

Palivo	Spalovací vzduch	Teplota [°C]	O ₂ [%]	HCl $\left[\frac{mg}{m_N^3}\right]$	HF $\left[\frac{mg}{m_N^3}\right]$
Pelety ze smrkového dřeva	PPSV	890 ± 3,8	8,1 ± 0,5	4,04 ± 0,51	0,99 ± 0,20
	SPSV	897 ± 12,0	7,9 ± 0,5	3,36 ± 0,44	0,80 ± 0,17
Pelety ze slunečnicových slupek	PPSV	851 ± 5,4	7,2 ± 0,7	1,49 ± 0,33	0,0092 ± 0,11
	SPSV	887 ± 4,2	9,0 ± 0,7	2,24 ± 0,76	0,12 ± 0,14
Pelety z obilných plev	PPSV	841 ± 3,1	9,4 ± 0,4	68 ± 2,4	0,32 ± 0,10
	SPSV	854 ± 4,4	10,5 ± 0,5	63 ± 2,3	0,74 ± 0,13

8 Závěr

Výstupem této diplomové práce je zhodnocení vlivu spalovací teploty, přebytku vzduchu a vlivu stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu na tvorbu plynných znečišťujících látek při spalování 3 druhů biomasy. Pro zhodnocení byly využity jejich hmotnostní koncentrace a emisní faktory vztahované na hmotnost paliva a výhřevnost. Jako paliva pro experimenty byly použity pelety ze smrkového dřeva, slunečnicových slupek a obilných plev. Pro každé z těchto paliv bylo provedeno šest experimentálních měření, lišících se použitou teplotou fluidní vrstvy a koncentrací kyslíku ve spalinách. Také byl zhodnocen vliv použití stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu oproti využití pouze primárního.

Nejprve byl pro tři naměřené stavy porovnán vliv použité teploty ve fluidní vrstvě. Při využití vyšších teplot docházelo zároveň i k vyšší produkci emisí SO_2 . Produkce CO téměř nezávisela na teplotě fluidní vrstvy pro použité rozmezí teplot. Jedinou výjimkou byly pelety ze slunečnicových slupek, u kterých při teplotě $800\text{ }^\circ\text{C}$ docházelo k velmi výraznému nárůstu CO, pravděpodobně kvůli vyššímu uvolňování prchavé hořlaviny a tím i nedostatečnému dohořívání CO ve spalinách. K poklesu produkce emisí NO_x docházelo při zvyšování teploty fluidní vrstvy. Tato teplota měla vliv i na konverzní faktor $\text{N} - \text{NO}$, kdy docházelo k menšímu procentu vzniku palivových NO_x při vyšších teplotách. Z porovnání teplotních profilů byl patrný vliv teploty na dohořívání prchavé hořlaviny. Tato závislost byla nejvýraznější u slunečnicových pelet, které mají obsah prchavé hořlaviny nejvyšší. Proto dohořívání tohoto paliva trvalo déle a nastavení teploty mělo i z hlediska produkce emisí na toto palivo největší vliv.

Dále byl vyhodnocen vliv přebytku spalovacího vzduchu na tvorbu plynných znečišťujících látek. V případě SO_2 nedošlo při použití různých koncentrací kyslíku ve spalinách k téměř žádným změnám. Při 4 % koncentraci kyslíku však docházelo k prudkému nárůstu emisí CO u slunečnicových pelet, u zbylých dvou paliv nebyl tento vliv zaznamenán. Produkce NO_x s vyšší koncentrací kyslíku pak pro všechny tři paliva narůstala, zároveň byl vyšší i jejich konverzní faktor. Z teplotních profilů je patrné, že s vyšším přebytkem spalovacího vzduchu docházelo k intenzivnějšímu spalování paliv, což mělo opět nejvýraznější vliv na slunečnicové pelety, s nejvyšším podílem prchavé hořlaviny.

Použití stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu nemělo výraznější vliv na produkci žádné ze sledovaných plynných znečišťujících látek v provedených měřeních. U teplotních profilů byl vidět vliv přívodu sekundárního spalovacího vzduchu z důvodu intenzivnějšího dohořívání v místě přívodu. Díky tomu docházelo k rychlejšímu ochlazení spalin ve freeboardu.

Množství emisí HCl se nejvýrazněji odvíjelo od množství chloru vázaného v palivu. K jejich nejvyšší produkci docházelo u použití pelet z obilných plev, kde byly hodnoty hmotnostních koncentrací HCl výrazně vyšší, než u zbylých dvou paliv. Pro množství emisí HF nebylo možné zhodnotit vliv množství fluoru vázaného v palivu na produkci HF z důvodu chybějícího prvkového rozboru pro fluor.

Z výsledků experimentálních měření je patrné, že pro co nejvhodnější průběh spalování z hlediska tvorby emisí je nutná optimalizace průběhu spalování. Množství vznikajících emisí se dá výrazně ovlivnit právě teplotou a koncentrací kyslíku ve spalinách použitého pro spalování. Často je ale nutné volit kompromis při použití těchto opatření, z důvodu odlišného efektu na produkci jednotlivých znečišťujících látek.

Na tuto práci by mělo být v budoucích letech navázáno a mohla by tak být rozšířena o řadu experimentálních měření, zahrnujících paliva z dalších druhů biomasy a také použití některých alternativních paliv.

Použitá literatura

- [1] § 2 odst. 1 písm. a) vyhlášky č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší - znění od 01.01.2020. In: . Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-415?citace=1#cast2>
- [2] *Spalování a kotle*. Praha, 2021. Studijní materiál - prezentace z přednášek.
- [3] OCHODEK, Tadeáš, Jan KOLONIČNÝ a Pavel JANÁSEK. *Metodická příručka ke studii "Potenciál biomasy, druhy, bilance a vlastnosti paliv z biomasy": studie v rámci projektu Možnosti lokálního vytápění a výroby elektřiny z biomasy*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1207-X.
- [4] BOLHAR-NORDENKAMPF, Marcu, Ingo TSCHANUN a Sebastian KAISER. *Operating Experience from two new Biomass fired FBC-Plants*. 2006. Dostupné z: doi:10.13140/2.1.3985.8248
- [5] STRAŠIL, Zdeněk a Josef ŠIMON. Stav a možnosti využití rostlinné biomasy v energetice ČR. *Biom.cz* [online]. [cit. 2022-06-06]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/stav-a-moznosti-vyuziti-rostlinne-biomasy-v-energetice-cr>
- [6] *Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy České republiky za rok 2020*. ERÚ, 2022.
- [7] *Vývoj hrubé výroby elektřiny a tepla k prodeji v energetické bilanci ČR*. ERÚ, 2022.
- [8] OCHODEK, Tadeáš, Jan KOLONIČNÝ a Pavel JANÁSEK. *Potenciál biomasy, druhy, bilance a vlastnosti paliv z biomasy: studie v rámci projektu Možnosti lokálního vytápění a výroby elektřiny z biomasy*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1207-x.
- [9] OCHODEK, Tadeáš, Jan KOLONIČNÝ a Michal BRANC. *"Technologie pro přípravu a energetické využití biomasy": studie v rámci projektu "Možnosti lokálního vytápění a*

výroby elektřiny z biomasy". 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1426-1.

- [10] Nejlepší dostupné techniky (BAT). In: *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/prumysl-a-zivotni-prostredi/ippc-integrovana-prevence-a-omezovani-znecistení/referencni-dokumenty-bref/nejlepsi-dostupne-techniky-bat--224368/>
- [11] *Část 2 vyhlášky č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší - znění od 01.01.2020*. In: . Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-415>
- [12] STUPAVSKÝ, Vladimír. *Směrnice o Ekodesignu pro kotle a kamna na tuhá paliva: redakce TZB-info* [online]. [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotlikove-dotace/11937-smernice-o-ekodesignu-pro-kotle-a-kamna-na-tuha-paliva>
- [13] *Nařízení Komise (EU) 2015/1189 ze dne 28. dubna 2015, kterým se provádí směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/125/ES, pokud jde o požadavky na ekodesign kotlů na tuhá paliva (Text s významem pro EHP)*. In: . Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/ALL/?uri=CELEX:02015R1189-20170109>
- [14] VAN LOO, Sjaak a Jaap KOPPEJAN. *Handbook of biomass combustion and co-firing*. London: Earthscan, 2008. ISBN 978-1-84407-249-1.
- [15] HRDLIČKA, Jan. *Fluidní kotel na biomasu s inertní náplní Liapor: Sborník příspěvků ze semináře „Energie z biomasy X“*. VUT v Brně, 2009. ISBN 978-80-214-4027-2.
- [16] SKOPEC, Pavel, Jiří ŠTEFANICA a Jan HRDLIČKA. Výběr inertních materiálů pro fluidní spalování biomasy. *Energie z biomasy XIII – odborný seminář*. Brno, 2012, 6.
- [17] OKA, S. a E. ANTHONY. *Fluidized bed combustion*. New York: M. Dekker, 2004. Mechanical engineering (Marcel Dekker, Inc.), 162. ISBN 0-8247-4699-6.
- [18] OCHODEK, Tadeáš, Jan KOLONIČNÝ a Michal BRANC. *"Ekologické aspekty záměny fosilních paliv za biomasu": studie v rámci projektu "Možnosti lokálního vytápění a*

výroby elektřiny z biomasy". 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1595-4.

- [19] *Ekologie energetických zařízení*. Praha, 2021. Studijní materiál - prezentace z přednášek.
- [20] GLARBORG, P. Fuel nitrogen conversion in solid fuel fired systems. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 2003, 29(2), 89-113 [cit. 2022-06-05]. ISSN 03601285. Dostupné z: doi:10.1016/S0360-1285(02)00031-X
- [21] *Emise z kotelen a ochrana ovzduší (I)* [online]. tzb-info [cit. 2022-06-06]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-pevnymi-palivy/2294-emise-z-kotelen-a-ochrana-ovzdusi-i>
- [22] LECOMTE, Thierry, José DE LA FUENTE, Frederik NEUWAHL et al. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants*. 2017. ISBN 978-92-79-74303-0. Dostupné z: doi:10.2760/949
- [23] NOSKIEVIČ, Pavel, Jan KOLONIČNÝ a Tadeáš OCHODEK. *Malé zdroje znečišťování*. 1. VŠB - Technická univerzita v Ostravě - Výzkumné energetické centrum, 2004, 108.
- [24] HORÁK, Jiří, František HOPAN, Michal ŠYC, Pavel MACHÁLEK, Kamil KRPEC, Tomáš OCELKA a Tomáš TOMŠEJ. Balance emisí znečišťujících látek z malých zdrojů znečišťování se zaměřením na spalování tuhých paliv. *Chemické listy* 105, 851-855. 2011, 5.
- [25] NDIR Gas Analyzer for heat treatment furnace <ZFG>. In: *Fuji Electric Global* [online]. [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: https://www.fujielectric.com/products/instruments/products/anlz_gas/ZFG.html
- [26] SKOPEC, Pavel, Jan HRDLIČKA a Matěj VODIČKA. Dry additive desulfurization in oxyfuel bubbling fluidized bed combustor. *Fuel*. 2021, 283. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2020.118945

- [27] HRDLIČKA, Jan, Pavel SKOPEC, Tomáš DLOUHÝ a František HRDLIČKA. Emission factors of gaseous pollutants from small scale combustion of biofuels. *Fuel* [online]. 2016, 165, 68-74 [cit. 2022-05-18]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2015.09.087
- [28] DZURENDA, Ladislav, Juraj LADOMERSKY a Emília HRONCOVÁ. Conversion Factor of Fuel-Bound Nitrogen to Oxides in the Process of Spruce Wood Combustion in Boiler Grate Furnaces. *Polish Journal of Environmental Studies* [online]. 2015, 24 [cit. 2022-05-29]. ISSN 1230-1485. Dostupné z: doi:10.15244/pjoes/27408

Seznam obrázků

Obr. 1: Schéma spalování v kotli s bublinkující fluidní vrstvou [17].....	17 -
Obr. 2: Schéma spalování v kotli s cirkulující fluidní vrstvou s pomocnými systémy [17] ...	18 -
Obr. 3: Vliv teploty (vlevo) a součinitele přebytku vzduchu (vpravo) na vznik NO _x [21]	21 -
Obr. 4: NDIR analyzátor [25].....	26 -
Obr. 5: Schéma experimentální trasy [26]	28 -
Obr. 6: Pelety ze smrkového dřeva	29 -
Obr. 7: Pelety ze slunečnicových slupek.....	29 -
Obr. 8: Pelety z obilných plev	29 -
Obr. 9: Křemičitý písek	30 -

Seznam tabulek

Tab. 1: Výroba elektřiny brutto a tepla z biomasy mezi lety 2014 - 2019 (procentuální zastoupení vztaženo k PZE) [7]	- 7 -
Tab. 2: Příklady druhů nedřevní biomasy [3; 5]	- 9 -
Tab. 3: Specifické emisní limity pro stacionární zdroje uvedené do provozu 20. prosince 2018 nebo později [11]	- 12 -
Tab. 4: Specifické emisní limity pro stacionární zdroje uvedené do provozu před 20. prosincem 2018 [11]	- 13 -
Tab. 5: Požadavky a limity na ekodesign pro kotle na tuhá paliva s platností od 1. ledna. 2020 [13]	- 15 -
Tab. 6: Přehled schválených hodnot emisních limitů a účinností pro interiérová topidla s platností od 1. ledna. 2022 [12]	- 15 -
Tab. 7: Výška jednotlivých termočlánků ve spalovací komoře od dna distributoru	- 29 -
Tab. 8: Hrubá a prvková analýza paliv	- 29 -
Tab. 9: Charakteristika inertního materiálu - písku	- 30 -
Tab. 10: Matice měření	- 31 -
Tab. 11: Vliv teploty ve fluidní vrstvě na tvorbu emisí v průběhu spalování při požadované koncentraci kyslíku okolo 8 %	- 35 -
Tab. 12: Vliv teploty fluidní vrstvy na emisní faktory	- 36 -
Tab. 13: Vliv teploty na konverzní faktor NO _x	- 40 -
Tab. 14: Vliv koncentrace kyslíku ve spalinách na tvorbu emisí v průběhu spalování při teplotách fluidní vrstvy okolo 850 °C	- 42 -
Tab. 15: Vliv koncentrace kyslíku na emisní faktory	- 43 -
Tab. 16: Vliv koncentrace kyslíku ve spalinách na konverzní faktor NO _x	- 47 -
Tab. 17: Vliv stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu (SPSV) na tvorbu emisí v průběhu spalování v porovnání se spalováním s přívodem pouze primárního přívodu spalovacího vzduchu (PPSV)	- 49 -
Tab. 18: Vliv stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu na emisní faktory	- 50 -
Tab. 19: Vliv stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu na konverzní faktor NO _x	- 53 -
Tab. 20: Množství hmotnostní koncentrace emisí HCl a HF ve spalinách	- 55 -

Seznam grafů

Graf 1: Vliv teploty na emisní faktor SO ₂ vztažený na hmotnost paliva.....	37 -
Graf 2: Vliv teploty na emisní faktor CO vztažený na hmotnost paliva.....	38 -
Graf 3: Vliv teploty na emisní faktor NO _x vztažený na hmotnost paliva	39 -
Graf 4: Vliv teploty na konverzní faktor N - NO.....	40 -
Graf 5: Teplotní profil 800 °C, 8 % O ₂	41 -
Graf 6: Teplotní profil 850 °C, 8 % O ₂	41 -
Graf 7: Teplotní profil 900 °C, 8 % O ₂	41 -
Graf 8: Vliv koncentrace kyslíku ve spalínách na emisní faktor SO ₂ vztažený na hmotnost paliva.....	44 -
Graf 9: Vliv koncentrace kyslíku ve spalínách na emisní faktor CO vztažený na hmotnost paliva	45 -
Graf 10: Vliv koncentrace kyslíku ve spalínách na emisní faktor NO _x vztažený na hmotnost paliva.....	46 -
Graf 11: Vliv koncentrace kyslíku ve spalínách na konverzní faktor N - NO	47 -
Graf 12: Teplotní profil 850 °C, 4 % O ₂	48 -
Graf 13: Teplotní profil 850 °C, 8 % O ₂	48 -
Graf 14: Teplotní profil 850 °C, 12 % O ₂	48 -
Graf 15: Vliv stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu na emisní faktor SO ₂ vztažený na hmotnost paliva.....	50 -
Graf 16: Vliv stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu na emisní faktor CO vztažený na hmotnost paliva.....	51 -
Graf 17: Vliv stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu na emisní faktor NO _x vztažený na hmotnost paliva.....	52 -
Graf 18: Vliv stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu na konverzní faktor N - NO.....	53 -
Graf 19: Teplotní profil – Stupňovitý přívod vzduchu	54 -
Graf 20: Teplotní profil – Primární přívod spalovacího vzduchu.....	54 -