



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

## PLYNNÉ EMISE ZE SPALOVÁNÍ BIOMASY

EMISSIONS FROM BIOMASS COMBUSTION

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavel Ptáček

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2018



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Pavel Ptáček**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.**  
Akademický rok: 2017/18

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

## **Plynné emise ze spalování biomasy**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Přes neustálý tlak na snižování emisí ze spalovacích zdrojů je sektor domovního vytápění jedním z hlavních zdrojů nežádoucích látek jsou oxidy síry, dusíku, oxid uhelnatý a tuhé znečišťující látky. Bakalářská práce je zaměřena na zjištění vlastností jednotlivých plynných emisí a dopady na životní prostředí. Součástí práce bude také praktická spalovací zkouška, při které budou zjištěny koncentrace plynných znečišťujících látek a určení emisní třídy kotlů.

### **Cíle bakalářské práce:**

- přehled škodlivin a jejich dopad na zdraví člověka a ŽP
- experimentální určení emisí konkrétního spalovacího zařízení

### **Seznam doporučené literatury:**

VEJVODA, Josef, Pavel MACHAČ a Petr BURYAN. Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2003. ISBN 80-708-0517-X.

HEMERKA, Jiří, Pavel VYBÍRAL. Ochrana ovzduší. Praha: ČVUT v Praze, 2010. ISBN 978-80--1-04646-3

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

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá tvorbou plynných emisí ze spalování biomasy. Popisuje, jak emise vznikají a jaký mají dopad na zdraví člověka a životní prostředí. V experimentální části byly změřeny a porovnány emise pro různá paliva na dvou spalovacích zařízeních. Také byly určeny emisní třídy těchto spalovacích zařízení.

### **Klíčová slova**

Plynné emise, biomasa, spalování, emisní třída, oxidy dusíku, oxid siřičitý, oxid uhelnatý

## **ABSTRACT**

Bachelor thesis deals with production of gaseous emissions from biomass combustion. It describes how emissions arise and how they affect human health and environment. In experimental part of the thesis emissions were measured and compared for different types of fuel in two combustion devices. Emission classes of combustion devices were also determined.

### **Key words**

Gaseous emissions, biomass, combustion, emission class, nitrogen oxides, sulphur dioxide, carbon monoxide

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

PTÁČEK, P. *Plynné emise ze spalování biomasy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 42 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D..

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Plynné emise ze spalování biomasy“ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....  
Datum

\_\_\_\_\_  
Jméno a příjmení

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Markovi Balášovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Otakarovi Štelcovi za pomoc a rady v průběhu měření.

---

podpis



## OBSAH

1	Úvod .....	11
2	Oxidy dusíku .....	12
2.1	Vlastnosti NO a NO <sub>2</sub> .....	12
2.1.1	Oxid dusnatý (NO).....	12
2.1.2	Oxid dusičitý (NO <sub>2</sub> ) .....	12
2.2	Dopady na životní prostředí.....	12
2.3	Dopady na zdraví člověka.....	13
2.4	Vznik oxidů dusíku .....	14
2.4.1	Vysokoteplotní (termické) NO <sub>x</sub> .....	15
2.4.2	Palivové oxidy dusíku (nízkoteplotní) .....	16
2.4.3	Promptní oxidy dusíku .....	17
2.5	Denitrifikace spalin.....	17
2.5.1	Primární opatření ke snížení tvorby NO <sub>x</sub> .....	17
2.5.2	Sekundární opatření ke snížení tvorby NO <sub>x</sub> .....	18
3	Oxidy síry .....	19
3.1	Vlastnosti oxidů síry .....	19
3.1.1	Oxid siřičitý SO <sub>2</sub> .....	19
3.1.2	Oxid sírový SO <sub>3</sub> .....	19
3.2	Dopady na životní prostředí.....	20
3.3	Dopady na zdraví člověka.....	21
3.4	Vznik oxidu siřičitého.....	22
3.5	Snižování emisí oxidů síry.....	22
4	Oxidy uhlíku .....	23
4.1	Vlastnosti oxidů uhlíků.....	23
4.1.1	Oxid uhelnatý (CO).....	23
4.1.2	Oxid uhličitý (CO <sub>2</sub> ) .....	23
4.2	Dopady na životní prostředí a zdraví člověka.....	23
4.3	Vznik oxidu uhelnatého .....	24
4.4	Snižování emisí oxidu uhelnatého .....	24
5	Experimentální část .....	25
5.1	Cíle experimentu.....	25
5.2	Průběh experimentu .....	25
5.3	Popis zařízení .....	28

5.3.1	Kotel Verner A251 .....	28
5.3.2	Analyzátory spalin SIEMENS ULTRAMAT 21/O <sub>2</sub> a ULTRAMAT 22....	28
5.4	Metodika vyhodnocení naměřených hodnot .....	29
6	Zpracování výsledků a vyhodnocení měření .....	30
6.1	Porovnání emisí při spalování dřeva na dvou různých zařízeních .....	30
6.2	Porovnání emisí na kotli Verner A251 pro různé druhy pelet .....	32
6.3	Závislost koncentrací oxidů dusíku a oxidu uhelnatého na množství kyslíku	35
6.4	Porovnání emisí oxidu siřičitého pro jednotlivá paliva.....	36
7	Závěr .....	38
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	39
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	41
	SEZNAM CHEMICKÝCH SLOUČENIN A PRVKŮ .....	42

## **1 Úvod**

V dnešní době spojené s postupným nárůstem spotřeby energií společně s omezenými zásobami fosilních paliv, jakožto v současnosti nejvýznamnějšího zdroje těchto energií, je aktuální zvyšující se snaha o nalezení dalších, ideálně alternativních zdrojů. Jedním z takových zdrojů je také biomasa, která je charakterizována jako souhrn látek tvořící živé organismy. Mezi hlavní přednosti biomasy patří obnovitelnost a relativně snadná dostupnost, např. využití zemědělských plodin.

Přes neustálý tlak na snižování emisí ze spalovacích zdrojů je sektor domovního vytápění jedním z hlavních zdrojů nežádoucích látek jako jsou oxidy síry, dusíku, oxid uhelnatý a tuhé znečišťující látky. Již v současné době dochází k postupnému omezování spalovacích zařízení, které vyvrcholí v roce 2022. Požadavky, které budou muset spalovací zařízení splňovat, jsou uvedeny v normě ČSN EN 303–5 a směrnici o Ekodesignu 2009/125/ES.

V první části této práce jsou stručně rozebrány vznikající plynné emise. Popsány jsou základní fyzikální a chemické vlastnosti těchto oxidů, způsoby jejich využití v průmyslové výrobě, dále dopady na životní prostředí a s tím spojené zdraví člověka. Na závěr každé kapitoly jsou také stručně uvedeny základní principy vzniku a následné likvidace jednotlivých oxidů.

V následující experimentální části je nejdříve zpracován popis měření a přístrojů při něm použitých. Nicméně hlavním cílem této práce je zpracování a porovnání výsledků měření plynných emisí na dvou různých spalovacích zařízeních a s použitím několika druhů paliv. Konkrétně se jedná o porovnání dvou různých kotlů při použití stejného paliva – dřeva a určení jejich emisní třídy, dále porovnání množství jednotlivých emisí vzniklých při spalování různých druhů paliv. Na chybném měření je také znázorněna závislost emisí oxidů dusíku a oxidu uhelnatého na množství kyslíku ve spalovacím procesu.

## 2 Oxidy dusíku

Problematika oxidů dusíku patří mezi základní problémy ochrany ovzduší. V atmosféře se vyskytuje několik druhů oxidů dusíku, souhrnně značeno  $\text{NO}_x$ , ovšem pro naše účely jsou nejzásadnější oxid dusnatý  $\text{NO}$  a oxid dusičitý  $\text{NO}_2$ . Další formy  $\text{NO}_x$ , například  $\text{N}_2\text{O}_3$  nebo  $\text{N}_2\text{O}_5$  jsou z hlediska vlivu na ochranu ovzduší nevýznamné.

### 2.1 Vlastnosti $\text{NO}$ a $\text{NO}_2$

Tabulka 1: Fyzikální vlastnosti oxidů dusíku [1,2,3]

	Oxid dusnatý ( $\text{NO}$ )	Oxid dusičitý ( $\text{NO}_2$ )
Molární hmotnost [kg/kmol]	30,01	46,01
Molární objem [ $\text{m}^3/\text{kmol}$ ]	22,41	22,41
Hustota [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	1,339	2,053
Bod tání [ $^{\circ}\text{C}$ ]	-163,6	-11,2
Bod varu [ $^{\circ}\text{C}$ ]	-151,7	21,2

#### 2.1.1 Oxid dusnatý ( $\text{NO}$ )

Oxid dusnatý je bezbarvý, paramagnetický plyn, za vyšších koncentrací jedovatý a za přítomnosti vlhkosti leptavý plyn. Vzniká primárně při spalování paliv. Jedná se o relativně málo reaktivní plyn, který v atmosféře pomalu oxiduje na  $\text{NO}_2$ . Naopak ve vnitřním prostředí s menším obsahem UV záření a ozónu probíhá oxidační reakce řadu hodin, během kterých dojde k výměně vzduchu infiltrací. Ve vnitřním prostředí jsou proto koncentrace  $\text{NO}$  většinou zcela nevýznamné. [1]

#### 2.1.2 Oxid dusičitý ( $\text{NO}_2$ )

Oxid dusičitý je červenohnědý, agresivní a jedovatý plyn. Vzniká ve spalovacích motorech oxidací vzdušného dusíku za vysokých teplot, uvolňuje se také rozkladem kyseliny dusičné. [1]

Další možnost využití je například jako oksidčivadlo v raketové technice. [4]

### 2.2 Dopady na životní prostředí

Dusík je sám o sobě biogenním prvkem, to znamená, že je v přiměřeném množství nezbytný pro růst rostlin. V dnešní době je běžně dodáván do půdy ve formě různých hnojiv pro podporu růstu plodin. Na druhou stranu oxidy dusíku ve vyšších koncentracích rostliny poškozují a mohou způsobit jejich větší náchylnost k negativním vlivům okolí jako je mráz či plísň.

Oxid dusičitý je společně s oxidy síry součástí kyselých dešťů, které mohou mít negativní vliv na vegetaci, různé druhy staveb nebo se mohou projevat okyselením vodních toků a ploch. Je třeba zdůraznit, že množství dusíku, které se dostává do půd z atmosféry, již není

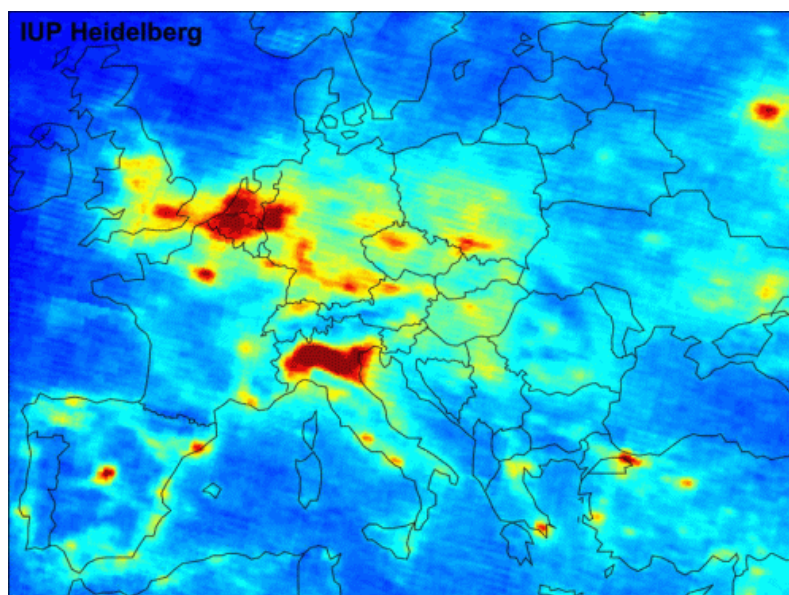
zanedbatelné ve srovnání s množstvím pocházejícím z průmyslových hnojiv. Dusičnanové ionty, které jsou potom v zeminách a vodách přítomny, sice působí příznivě na růst rostlin, avšak při vyšších koncentracích může docházet i k úhynu ryb a nežádoucímu nárůstu vodních rostlin (tzv. eutrofizace vod).

Oxid dusičitý společně s kyslíkem a těkavými organickými látkami také přispívá k tvorbě přízemního ozonu a vzniku tzv. fotochemického smogu<sup>1</sup>. Vysoké koncentrace přízemního ozonu poškozují živé rostliny včetně mnohých zemědělských plodin.

Oxid dusnatý je dalším ze skleníkových plynů. Shromažďuje se v atmosféře s ostatními skleníkovými plyny a společně absorbují infračervené záření zemského povrchu, které by jinak uniklo do vesmírného prostoru. Přispívá tak ke vzniku tzv. skleníkového efektu, který následně způsobuje globální oteplování planety. [5]

### 2.3 Dopady na zdraví člověka

Oxidy dusíku mohou negativně působit na zdraví člověka především ve vyšších koncentracích, které se ovšem běžně v ovzduší nevyskytují. Vdechování vysokých koncentrací nebo dokonce čistých plynů ovšem vede k závažným zdravotním potížím a může způsobit i smrt. Předpokládá se, že se oxidy dusíku vážou na krevní barvivo a zhoršují tak přenos kyslíku z plic do tkání. Některé názory naznačují, že oxidy dusíku mohou mít určitou roli při vzniku nádorových onemocnění. [5] Dalšími příznaky mohou být například dýchací potíže, pálení očí, malátnost nebo snížení obranyschopnosti organismu.



Obr. 1: Rozložení koncentrace  $\text{NO}_2$  v ovzduší nad Evropou (červená = zvýšená koncentrace) [5]

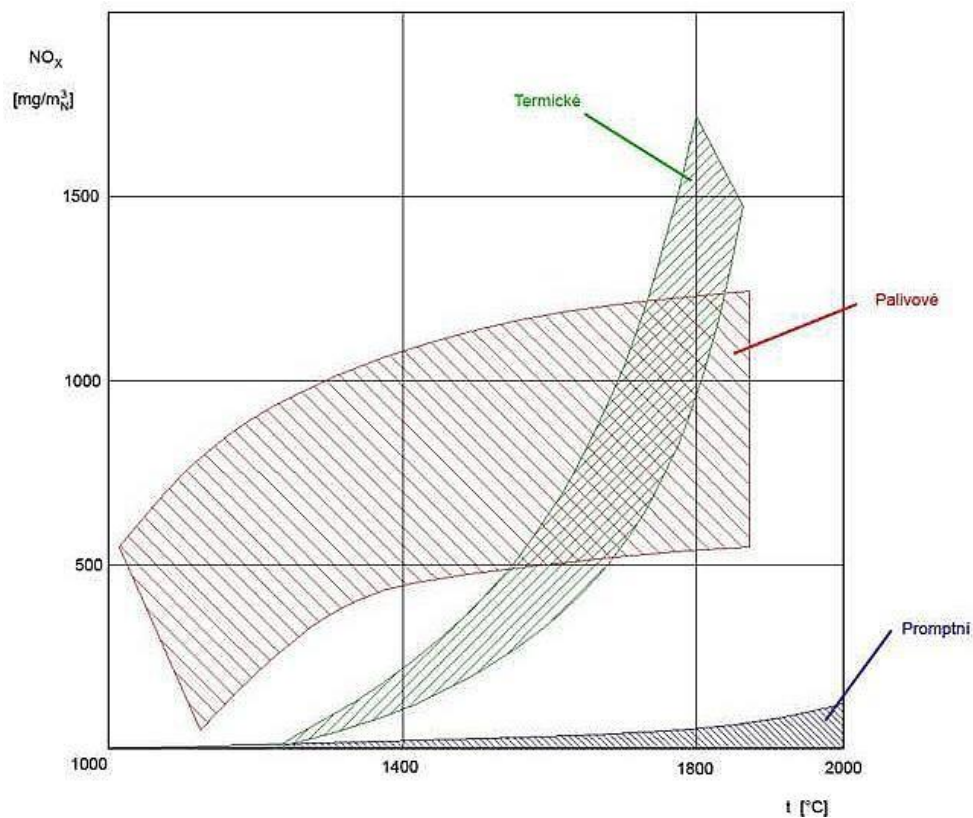
<sup>1</sup> Fotochemický smog je znečištění typické hlavně pro městské oblasti. Je tvořen látkami primárními, které vznikají například provozem dopravy, ale i sekundárními, které vznikají spolupůsobením slunečního záření. [6]

## 2.4 Vznik oxidů dusíku

Při spalování paliv ve stacionárních zařízeních se tvoří především oxid dusnatý, jehož podíl na celkovém obsahu  $\text{NO}_x$  bývá 90–99 %. Většinou se uvádí, že při spalování tuhých paliv činí obsah  $\text{NO}_2$  1–5 %, při spalování kapalných 1–10 %. Po ochlazení spalin se  $\text{NO}$  rychle mění na  $\text{NO}_2$ , který společně s vodní párou tvoří  $\text{HNO}_3$  a  $\text{HNO}_2$  a které jsou obsaženy v kyselých deštích. [7]

Teoreticky lze vznik oxidů dusíku rozdělit do tří zásadních mechanismů. Jsou to:

- Vysokoteplotní (termický)  $\text{NO}_x$
- Palivové (nízkoteplotní)  $\text{NO}_x$
- Promptní (okamžitý)  $\text{NO}_x$



Obr. 2: Závislost tvorby  $\text{NO}_x$  na teplotě při spalování uhlí [1]

2.4.1 Vysokoteplotní (termické) NO<sub>x</sub>

Tvoří se při spalování za vysokých teplotách v kotelních agregátech oxidací dusíku obsaženého ve spalovacím vzduchu. Rychlost tvorby úměrně závisí na teplotě a délce styku při této teplotě. Ve významném množství se začínají tvořit při teplotách nad 1200 °C. Jejich množství roste exponenciálně s rostoucí teplotou, jak dokazují hodnoty v tabulce. [7]

Tabulka 2: Závislost tvorby vysokoteplotních oxidů dusíku na teplotě [7]

<b>Teplota [°C]</b>	700	900	1200	1600	1800
<b>Koncentrace NO [mg/m<sup>3</sup>]</b>	11	68	420	1920	3300

Tvorba NO<sub>x</sub> při vyšších teplotách lze popsat následujícími rovnicemi [7]:

- Při přebytku kyslíku:



- Při přebytku paliva:



Tvorbu vysokoteplotních NO<sub>x</sub> vyjadřuje Zeldovičův mechanismus [7]:

$$[NO] = k_1 \cdot e^{-k_2/T} \cdot [N_2] \cdot [O_2]^{0,5} \cdot t \quad (4)$$

Kde:

- k<sub>1</sub> a k<sub>2</sub> jsou konstanty změřené při spalování zemního plynu

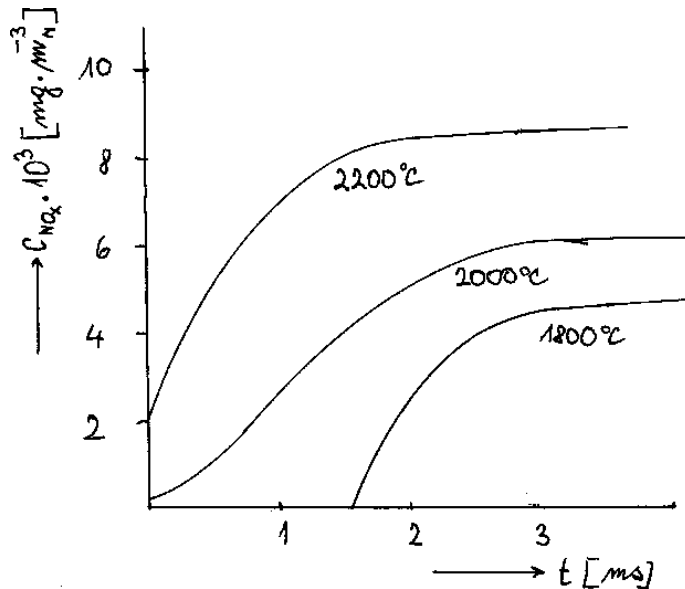
$$(k_1 = 5,74 \cdot 10^{14}, k_2 = 6447,65 \text{ K})$$

- T je absolutní teplota [K]
- t je doba styku [s]

Z výše uvedeného vztahu plyne, že koncentrace vysokoteplotních NO<sub>x</sub> je závislá na teplotě [T], koncentraci dusíku [N<sub>2</sub>], odmocnině koncentrace kyslíku [O<sub>2</sub>]<sup>0,5</sup> a době styku [t].

Hlavními faktory tvorby vysokoteplotních  $\text{NO}_x$  jsou [7]:

- Teplota plamene v ohništi vyšší než  $1200\text{ }^\circ\text{C}$
- Reakční době (době zdržení)
- Koncentraci  $\text{O}_2$  při spalování



Obr. 3: Tvorba termických  $\text{NO}_x$  v závislosti na čase spalování [7]

#### 2.4.2 Palivové oxidy dusíku (nizkoteplotní)

Palivový  $\text{NO}_x$  vzniká oxidací dusíku, resp. dusíkatých sloučenin chemicky vázaných v palivu. Dusík, spolu s uhlíkem, kyslíkem, vodíkem a sírou tvoří základ hořlavé části paliva – hořlaviny. U tuhých paliv se tvorba palivového  $\text{NO}_x$  předpokládá ve dvou reakcích:

- Oxidace dusíku v prchavé hořlavině
- Oxidace dusíku obsaženého ve struktuře molekuly paliva

Molekulární  $\text{N}_2$  v zemním plynu nepředstavuje palivový N. Problematika palivových  $\text{NO}_x$  tak spočívá pouze u tuhých a kapalných paliv. Hlavní opatření ke snižování  $\text{NO}_x$  u tuhých paliv směřují k potlačení vzniku palivových  $\text{NO}_x$ . [1]



Tabulka 3: Obsah dusíku v pevných palivech s obsahem vody do 15 %. [8]

Palivo	Dusík vázaný v palivu (% hmot.)
Sláma	0,5
Dřevo	0,1
Dřevní uhlí	0,1
Rašelina	0,8
Uhlí hnědé	1,4
Uhlí černé	1,4
Koks	0,5

Mechanismus přeměny dusíku na oxid dusnatý v uhlí se děje ve třech krocích:

- Při odplynění dusíku v uhlí
- Při spalování dusíku obsaženého ve vzniklém plynu
- Spalování dusíku v koksu (heterogenní proces)

Rychlost přeměny dusíkatých látek obsažených v hořlavině paliva na NO roste s teplotou ohřevu. Obsah NO takto vzniklého je asi 2,5krát vyšší než dusík vzniklý heterogenním spalováním odplyněného paliva [7].

### 2.4.3 Promptní oxidy dusíku

Promptní NO<sub>x</sub> vznikají reakcí N<sub>2</sub> a uhlovodíkových radikálů v nejvyšších teplotách v počáteční fázi hoření na čele plamene a je pouze jinou formou palivových NO<sub>x</sub>. Jejich podíl na celkové tvorbě NO<sub>x</sub> je minimální. Tato tvorba je málo závislá na vlastní teplotě plamene a době zdržení a odtud vzniknul název promptní – okamžitý. Snižování přebytku vzduchu nemá na tvorbu promptních NO<sub>x</sub> téměř žádný vliv. Tvorbu promptních NO<sub>x</sub> tak nelze prakticky ovlivnit [1,7].

### 2.5 Denitrifikace spalin

Denitrifikace je proces, který obecně popisuje snižování (omezování) vzniku emisí NO<sub>x</sub>. V případě emisí dusíku rozlišujeme dva základní způsoby opatření – primární a sekundární.

#### 2.5.1 Primární opatření ke snížení tvorby NO<sub>x</sub>

Hlavním principem primárních opatření je snížení vzniku emisí přímo ve spalovací komoře, tzn. úpravou samotného procesu spalování. Úpravu tohoto procesu lze rozdělit do třech základních směrů [9]:

- Snižování teploty hoření
- Snižování lokální koncentrace kyslíku (při nejvyšší teplotě)
- Zkrácení doby zdržení v pásmu vysoké teploty

K dosažení lepších výsledků při spalovacím procesu se využívá několik základních technologických opatření. Mezi nejvýznamnější opatření patří [9]:

- Spalování s nízkým přebytkem vzduchu
- Snížení přehřátí spalovacího vzduchu
- Nestechiometrické spalování (dávkování spalovacího vzduchu ve dvou úrovních)
- Recirkulace spalin

Využitím všech možností při spalování práškových paliv je možné snížit emise  $\text{NO}_x$  až o 70 % u nových zařízení a o 40 až 60 % při rekonstrukci stávajících zařízení [1].

### 2.5.2 Sekundární opatření ke snížení tvorby $\text{NO}_x$

Sekundární opatření je proces likvidace už vzniklých spalin v procesu spalování, většinou využitím různých chemických reakcí, nejčastěji redukcí. Tyto opatření se uplatňují tam, kde primární opatření nestačí k dosažení emisního limitu nebo tam, kde to legislativa považuje za žádoucí nebo nezbytně nutné k dalšímu snížení emisí  $\text{NO}_x$  [1]. Účinnost těchto opatření je podstatně vyšší než u opatření primárních, ovšem je také spojena s až řádově vyšší cenou.

Nejvýznamnější sekundární opatření jsou:

- Selektivní katalytická redukce
- Selektivní nekatalytická redukce
- Neselektivní katalytická redukce
- Redukce  $\text{NO}_x$  na aktivním koksu

### 3 Oxidy síry

Většina emisí oxidu siřičitého produkovaných vlivem činnosti člověka vzniká při spalování fosilních paliv obsahujících síru. Dalšími zdroji jsou různé procesy, zejména výroba kyseliny sírové, zpracování ropy, výroba papíru, metalurgické procesy aj.

Přírodními zdroji emisí sloučenin síry jsou hlavně: bakteriální činnost, aerosoly uvolněné z mořské vodní tříště, vulkanická činnost a požáry vegetace. Tyto zdroje sice převažují nad výše zmíněnými procesy, jsou ovšem součástí přirozeného globálního cyklu, který je činností člověka narušen. Navíc produkce člověka je soustředěna do hustě obydlených oblastí a průmyslových center, oproti přirozené produkci rozložené relativně rovnoměrně [1].

#### 3.1 Vlastnosti oxidů síry

Tabulka 4: Fyzikální vlastnosti oxidů síry [1,10,11]

	Oxid siřičitý (SO <sub>2</sub> )	Oxid sírový (SO <sub>3</sub> )
Molární hmotnost [kg/kmol]	64,06	80,06
Molární objem [m <sup>3</sup> /kmol]	21,89	40,13
Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	2,93	1,995
Bod tání [°C]	-72,7	32,5
Bod varu [°C]	-10	44,8

##### 3.1.1 Oxid siřičitý SO<sub>2</sub>

Oxid siřičitý je bezbarvý, snadno zkapalnitelný, nehořlavý plyn se štiplavým kyselým zápachem. Do ovzduší se dostává především spalováním pevných paliv obsahujících síru. Vzdušnou vlhkostí se snadno hydratuje na aerosol kyseliny siřičité H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> a tím se značně podílí na vzniku kyselých dešťů. Ve vodném roztoku se také používá v potravinářství jako konzervant a antioxidant [1,4].

##### 3.1.2 Oxid sírový SO<sub>3</sub>

Oxid sírový není přímým produktem vzniklým ve spalovacím procesu, nicméně ve vzduchu vzniká oxidací oxidu siřičitého, proto je také krátce zmíněn. Je to bezbarvý, silně hygroskopický (pohlcující vodu) plyn. Jeho koncentrace v ovzduší je ovšem značně nižší než koncentrace SO<sub>2</sub>. Také oxid sírový se snadno hydratuje na aerosol kyseliny sírové H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a tím se podílí na vzniku kyselých dešťů [1,4].

### 3.2 Dopady na životní prostředí

Při nedostatku alkalických částic v ovzduší dochází k okyselení srážkových vod až na  $\text{pH} < 4$ . Tímto způsobem oxidy síry společně s oxidy dusíku tvoří takzvané kyselé deště [12]. Dlouhodobé působení kyselých dešťů se může projevit odumíráním převážně jehličnatých dřevin, dále poškozením průmyslových plodin nebo mikroorganismů a znehodnocením vodních zdrojů nebo úhynem ryb. Mezi další negativní účinky kyselých dešťů patří například koroze kovů, poškození stavebních materiálů, nátěrových hmot, textilu, kůže atd.



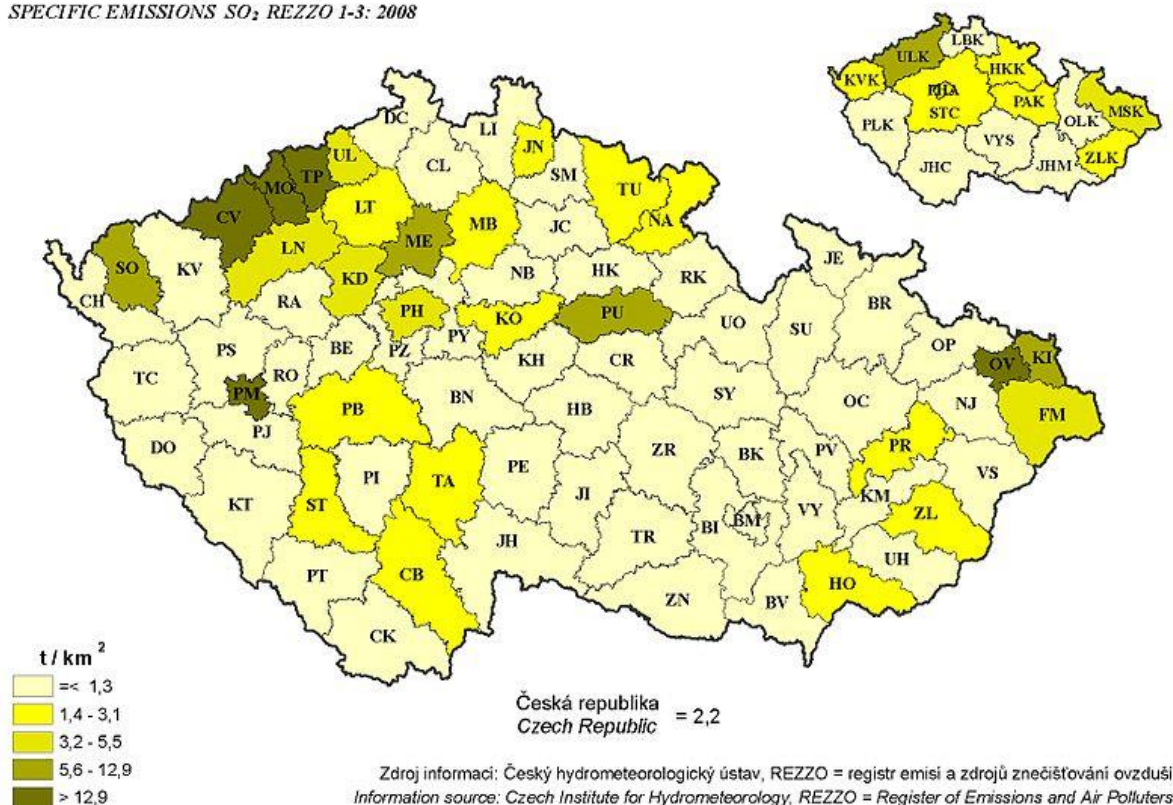
*Obr. 4: Poškození lesních porostů vlivem kyselých dešťů [13]*

### 3.3 Dopady na zdraví člověka

Při běžných koncentracích kolem  $0,1 \text{ mg/m}^3$  oxid siřičitý dráždí oči a horní cesty dýchací. Při koncentraci  $0,25 \text{ mg/m}^3$  dochází ke zvýšení respirační nemocnosti u citlivých dospělých i dětí. Koncentrace vyšší než  $0,5$  až  $0,7 \text{ mg/m}^3$  vede k vzestupu úmrtnosti u starých chronicky nemocných lidí, trpících zejména plicními a srdečními chorobami. Dlouhodobá expozice způsobuje ztrátu čichu, bolesti hlavy, nevolnosti, závratě a může vést ke zvýšení výskytu nemocí dýchacího ústrojí [4,12].

Dráždivá schopnost oxidu sírového je mnohem silnější než u oxidu siřičitého, protože reaguje s vlhkostí ve tkáních na kyselinu sírovou.

MĚRNÉ EMISE SO<sub>2</sub> (REZZO 1-3) V ROCE 2008  
SPECIFIC EMISSIONS SO<sub>2</sub> REZZO 1-3: 2008



Obr. 5: Množství měrných emisí oxidu siřičitého v okresech (krajích) ČR v roce 2008 [14]

### 3.4 Vznik oxidu siřičitého

Vznik emisí oxidů síry závisí pouze na obsahu síry v palivu a tím pádem je nelze ovlivnit procesem spalování. Pokud je síra v palivu obsažena, vyskytuje se v jedné ze čtyř hlavních forem. Jedná se o síru pyritickou, síranovou, organickou a v případě plynů ve formě sirovodíku, přičemž pouze síra síranová je ve stabilní oxidované formě a tím pádem není zdrojem oxidu siřičitého. Nedojde-li v průběhu spalování k navázání síry na vhodné látky (tzv. aditiva), oxiduje síra na oxid siřičitý a to tak, že z jednoho kilogramu palivové síry vznikají zhruba dva kilogramy oxidu siřičitého [15].

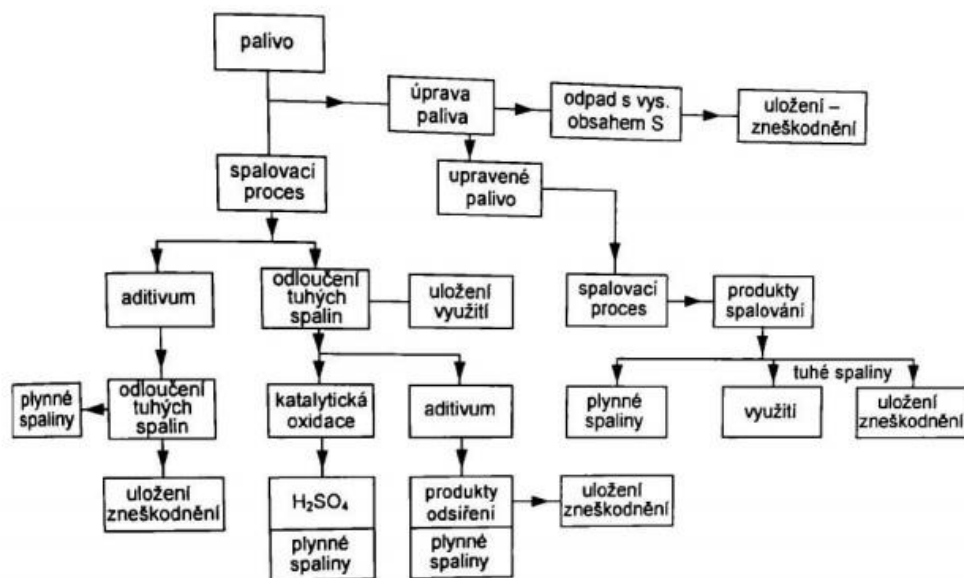
Množství emisí oxidu siřičitého závisí na měrné síranosti paliva  $S_m$  ( $g_{síry}/MJ$ ), udávané jako hmotnostní obsah síry v původním palivu  $S_p$  (%) vztažené k výhřevnosti paliva v původním stavu  $Q_r$  ( $MJ/kg$ ) [1]:

$$S_m (g_{síry}/MJ) = \frac{S_p(\%) \cdot 10}{Q_r(MJ/kg)} \quad (5)$$

### 3.5 Snižování emisí oxidů síry

Vzhledem k faktu, že vznik emisí síry nelze ovlivnit spalovacím procesem (primární opatření), je nutno síru eliminovat pomocí sekundárních opatření. Existuje několik možností, kterými lze tyto emise omezit [7]:

- Absolutní snižování spotřeby paliv – fungování této metody lze docílit spalováním v zařízeních s vyšší účinností nebo obecně úsporou vytvářeného produktu (např. elektrické energie nebo tepla).
- Náhradou paliv obsahujících síru za paliva nízkosírná nebo bez síry
- Odsiřováním spalin



Obr. 6: Základní schéma odsiřování [1]

## 4 Oxidy uhlíku

Emisí uhlíku vznikající při procesu spalování je oxid uhelnatý (CO), nicméně množství jeho vzniku je závislé i na množství vzniklého oxidu uhličitýho (CO<sub>2</sub>), který je proto také krátce zmíněn.

### 4.1 Vlastnosti oxidů uhlíků

Tabulka 5: Fyzikální vlastnosti oxidů uhlíku [16,17]

	Oxid uhelnatý (CO)	Oxid uhličitý (CO <sub>2</sub> )
Molární hmotnost [kg/kmol]	28,01	44,01
Molární objem [m <sup>3</sup> /kmol]	22,41	22,26
Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	1,25	1,98
Bod tání [°C]	-205	-56,6
Bod varu [°C] <sup>2</sup>	-191,5	-78,5

#### 4.1.1 Oxid uhelnatý (CO)

Oxid uhelnatý je hořlavý, bezbarvý, prudce jedovatý plyn bez zápachu s malou rozpustností ve vodě. Používá se v hutnictví při rafinaci kovového niklu, výrobě kyseliny octové a je součástí průmyslově významných plynů – vodního plynu a generátorového plynu.

#### 4.1.2 Oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>)

Oxid uhličitý je bezbarvý, lehce zkapalnitelný plyn bez chuti a zápachu. Používá se například při sycení nápojů, v kapalném stavu jako náplň do hasících přístrojů, v pevném stavu je známý jako tzv. suchý led. Jeho rozpuštěním ve vodě vzniká slabá kyselina uhličitá [4].

### 4.2 Dopady na životní prostředí a zdraví člověka

Oxid uhelnatý v atmosféře reaguje s jinými látkami za vzniku zvýšení koncentrace metanu, a především škodlivého přízemního ozonu (fotochemického smogu). Konečným produktem reakcí oxidu uhelnatého je oxid uhličitý, jehož zvýšené množství v atmosféře způsobuje skleníkový efekt.

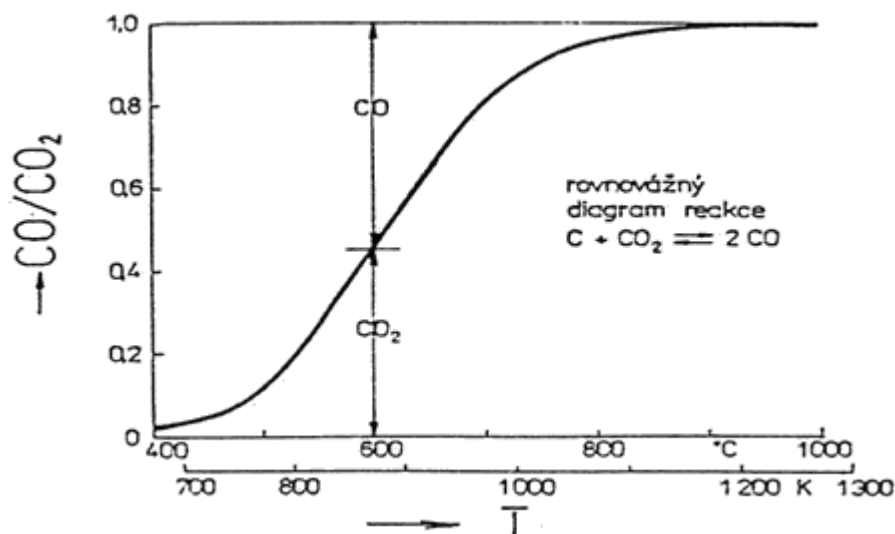
Největším rizikem pro zdraví člověka je schopnost oxidu uhelnatého vázat se na červené krevní barvivo (hemoglobin) silněji než kyslík. Vlivem nedostatku kyslíku může dojít k zadušení a při delším pobytu v prostředí s vysokou koncentrací může následovat i smrt [18].

---

<sup>2</sup> Oxid uhličitý za normálního (atmosférického) tlaku sublimuje – mění skupenství z pevného přímo na plynné [19].

### 4.3 Vznik oxidu uhelnatého

Vznik oxidu uhelnatého je přímo spojen s nedokonalostí spalovacího procesu. Hlavními příčinami nedokonalého spalování může být například nízká teplota nebo nedostatečný přístup kyslíku a s ním spojená špatná oxidace oxidu uhelnatého. Vliv teploty na úplnost konverze oxidu uhelnatého na oxid uhličitý při dostatečném přístupu kyslíku je uvedena na přiloženém obrázku. S nízkými emisemi oxidu uhelnatého je také přímo spojena nízká emise uhlovodíků  $\Sigma C_xH_y$ , které mohou být také škodlivé [15].



Obr. 7: Rovnovážený diagram reakce  $C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$  [15]

Naopak při dokonalém spalování vzniká převážně oxid uhličitý, který je výrazně méně škodlivý než oxid uhelnatý. Na druhou stranu příliš velký přebytek kyslíku s sebou nese řadu nedostatků, mezi které patří ochlazování plamene s následným zvýšením emisí oxidu uhelnatého nebo pokles účinnosti spalovacího zařízení z důvodu tepla ztraceného ohřevem přebytečného vzduchu.

### 4.4 Snižování emisí oxidu uhelnatého

Eliminace emisí oxidu uhelnatého představuje přesně opačný problém než u oxidu siřičitého. V tomto případě lze emise snižovat pouze pomocí primárních opatření, tedy ovlivnění procesu hoření, přesněji množstvím přivedeného kyslíku. Jak již bylo zmíněno výše, příliš velký přebytek kyslíku může způsobovat nežádoucí účinky. Hlavním cílem všech výrobců spalovacích zařízení je tedy nalezení kompromisu a vyladění daného zařízení tak, aby splňovalo předepsané emisní normy a zároveň fungovalo s dobrou účinností.



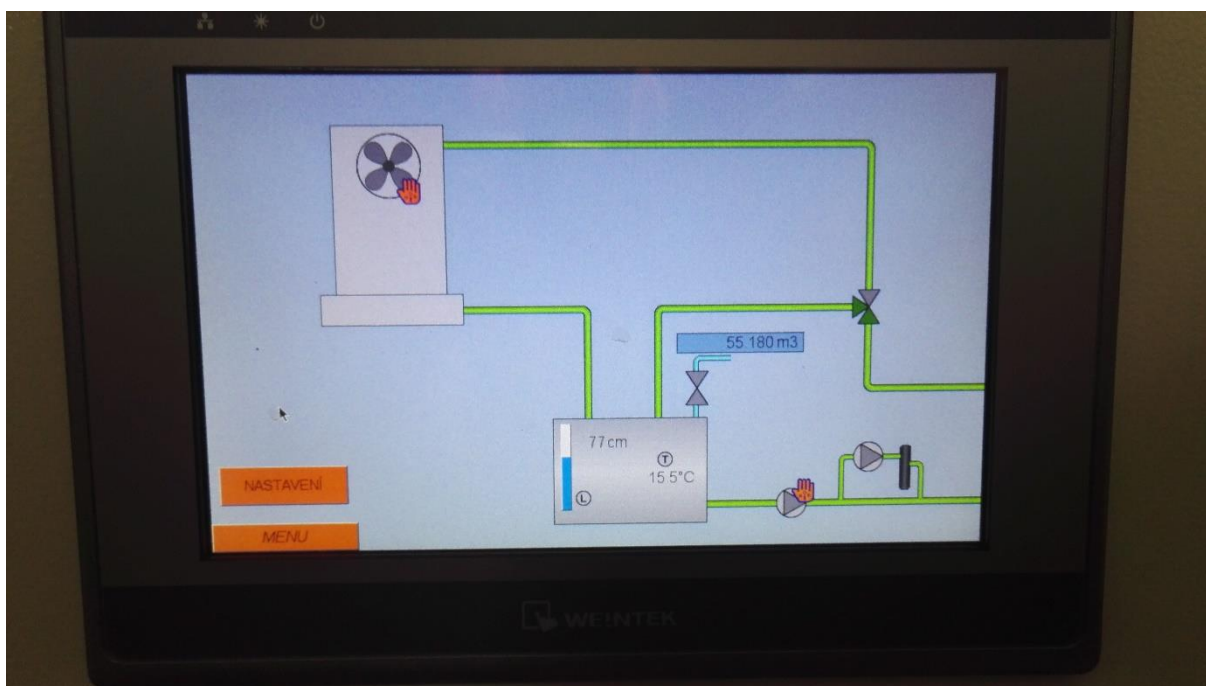
## 5 Experimentální část

### 5.1 Cíle experimentu

Hlavním cílem této práce je určení plynných emisí na konkrétních spalovacích zařízeních. Hlavní důraz je kladen na porovnání emisí mezi jednotlivými druhy paliv, případně stejných paliv na dvou různých zařízeních. Dalším výstupem bude určení emisní třídy jednotlivých kotlů. Výsledky těchto měření jsou zpracovány v následující kapitole.

### 5.2 Průběh experimentu

V experimentální části této práce byly použity data z více druhů spalovacích zařízení i více druhů paliv, nicméně pro tento názorný popis použijeme peletový kotel Verner A251. Kotel byl napojen v uzavřeném okruhu na teplovodní zásobník, který sloužil k ochlazení vody (viz schéma). Jako palivo posloužily pelety z digestátu<sup>3</sup> o průměru 6 mm.



Obr. 8: Schéma zapojení kotle

<sup>3</sup> Digestát je zbytek po fermentačním procesu vznikající při výrobě bioplynu v bioplynových stanicích [20].



Obr. 9: Pelety z digestátu o průměru 6 mm

Před samotnou zkouškou je nutné kotel řádně vyčistit od popela z předešlého měření a hlavně zkontrolovat správné zapojení všech potřebných čidel, snímačů a termočlánků. Pro následnou regulaci a kontrolu nás nejvíce zajímá vstupní a výstupní teplota vody, množství jejího průtoku, dále teplota spalin a tah (podtlak) v komíně. Dalším krokem bylo vyprázdnění palivového zásobníku, následně jeho doplnění správným palivem a roztopení kotle.

V průběhu roztápění bylo potřeba zapojit ještě jeden přístroj potřebný pro měření, a to analyzátor spalin, který snímá množství plynných emisí ( $\text{NO}_x$ , CO a  $\text{SO}_2$ ) a procenta kyslíku obsažené ve spalinách. Pro správné měření hodnot oxidu siřičitého bylo nutné použít vyhřívanou hadici. Za běžné laboratorní teploty oxid siřičitý reaguje s vodou za vzniku kondenzátu a analyzátor ukazuje nulové hodnoty emisí oxidu siřičitého. V zahřáté hadici se voda vypaří a my můžeme pozorovat správně hodnoty emisí.

Po úplném rozehrátí kotle následovala časově pravděpodobně nejnáročnější část přípravy. Před začátkem samotného měření je nutné vyladit nastavení kotle, aby docházelo k správnému dávkování paliva a následně jeho hoření. Parametry, které může uživatel ovlivnit jsou tyto:

- Interval plnění – doba v sekundách, po které se otevře přísun paliva ze zásobníku
- Doba plnění – doba v sekundách, po kterou zůstává přívod otevřený
- Ventilátor – výkon ventilátoru přivádějícího vzduch
- Interval roštování – doba v minutách, po které dojde k pohybu roštu a setřepání popela do zásobníku

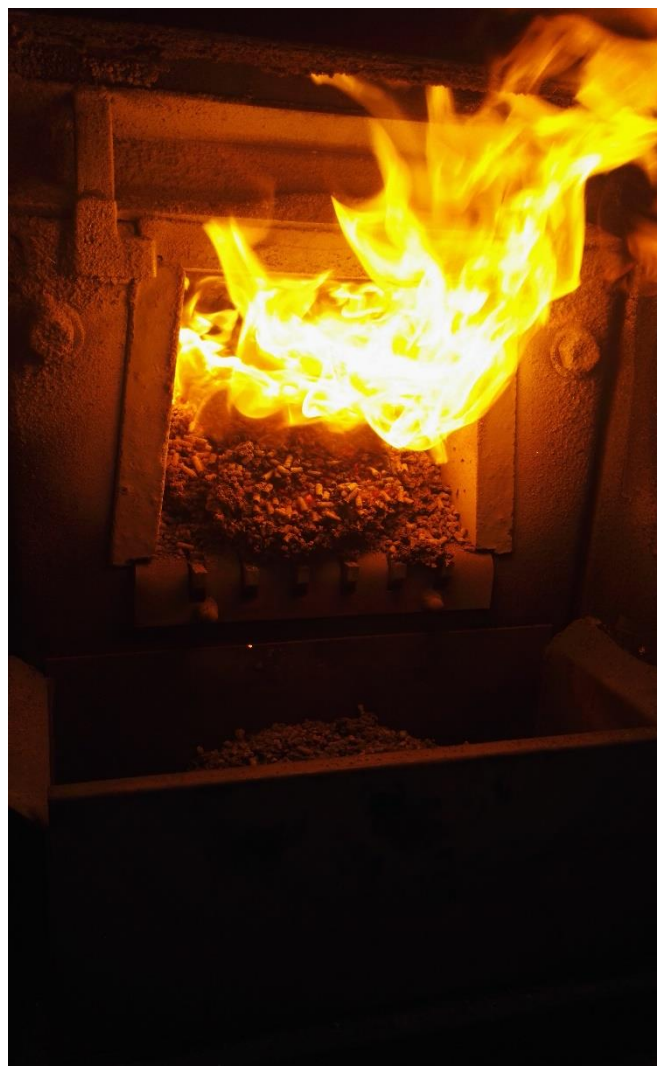
Konkrétní hodnoty nastavení pro proběhlé měření jsou uvedeny v tabulce na následující straně.

Tabulka 6: Nastavení kotle v průběhu celého měření

Čas	Interval plnění [s]	Doba plnění [s]	Ventilátor	Interval roštování [min]	Poznámka
9:00					Zapálení pelet
9:30	16	3	4. stupeň	12	Počáteční nastavení
10:17				5	Změna intervalu roštování kvůli jeho zasypávání.
10:38	17				Změna intervalu plnění.
10:57					Začátek prvního měření.
11:57			3. stupeň	3	Změna intervalu roštování kvůli jeho zasypávání. Snížení výkonu ventilátoru. Konec prvního měření.
12:12					Začátek druhého měření.
13:12					Konec měření

Z tabulky můžeme vidět, že po zhruba dvouhodinové přípravě byla provedena dvě měření, kdy každé z nich trvalo přesně jednu hodinu. Dále lze vyčíst, že po každé úpravě nastavení bylo nutné počkat okolo patnácti minut, než se proces hoření opět ustálí.

Poslední podstatnou věcí je změna nastavení mezi jednotlivými měřeními. Výkon ventilátoru byl snížen z důvodu získání jiných hodnot při menším přístupu vzduchu do kotle. Interval roštování bylo nutné upravit kvůli jeho zasypávání a následném spékání pelet, což můžeme vidět na obrázku.



Obr. 10: Zasypávání a spékání paliva uvnitř kotle

### 5.3 Popis zařízení

#### 5.3.1 Kotel Verner A251



Obr. 11: Kotel Verner A251

Verner A251 je automatický kotel o výkonu 25 kW pracující s účinností až 92 %. Nejvhodnějším palivem jsou dřevěné pelety, nicméně kotel je uzpůsoben i ke spalování agropelet, případně různých dalších přírodních materiálů. Výrobce uvádí, že kotel byl provozně odzkoušen s šedesáti druhy paliv [21]. Porovnání emisí jednotlivých paliv je uvedeno v následující kapitole.

#### 5.3.2 Analyzátor spalin SIEMENS ULTRAMAT 21/O<sub>2</sub> a ULTRAMAT 22

Analyzátor spalin je přístroj zaznamenávající hmotnostní průtok plynných emisí [mg/m<sup>3</sup>]. Aktuální hodnoty průtoku jsou zobrazovány na příslušných displejích. Pro další použití se ovšem používají průměrné hodnoty za jednu minutu, které se ukládají do připojeného počítače a následně je lze vyexportovat a použít pro další analýzu či výpočty.



Obr. 12: Analyzátor spalin

## 5.4 Metodika vyhodnocení naměřených hodnot

Z teoretické části již víme, že plynné emise oxidů dusíku i oxidu uhelnatého přímo závisí na množství kyslíku obsaženého ve spalovacím procesu. Z tohoto důvodu je nutné porovnávat pouze výsledky dosažené za podobných, ideálně totožných, hodnot kyslíku. Bohužel většina změřených hodnot tyto podmínky nespĺňuje, a proto je nutné tyto hodnoty přepočítat (vztáhnout) k zvolené referenční hodnotě kyslíku pomocí následujícího vztahu:

$$C_{REF} = C_{MĚR} \cdot \left( \frac{21 - O_{2,REF}}{21 - O_{2,MĚR}} \right) \quad (6)$$

Kde [22]:

- $C_{REF}$  [mg/m<sup>3</sup>] je výsledná koncentrace přepočítaná na referenční obsah kyslíku
- $C_{MĚR}$  [mg/m<sup>3</sup>] je hodnota skutečné změřené koncentrace
- $O_{2,REF}$  [%] je zvolená hodnota referenčního obsahu kyslíku
- $O_{2,MĚR}$  [%] je hodnota skutečného obsahu kyslíku ve spalování

Hodnoty referenčního obsahu kyslíku, na které se dle normy obvykle přepočítává jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka č.7: Referenční hodnoty obsahu kyslíku pro jednotlivé typy paliv

Palivo	Pevná paliva s výjimkou biomasy	Biomasa	Kapalná a plynná paliva
<b>Referenční obsah kyslíku [%]</b>	6	11	3

Tyto přepočítané hodnoty jsou následně nejčastěji využívány k určení emisní třídy kotlů. Přesné hodnoty pro jednotlivé třídy jsou uvedeny v tabulce na následujícím obrázku.

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon kW	Mezní hodnoty emisí								
			CO			OGC			prach		
			mg/m <sup>3</sup> při 10% O <sub>2</sub> <sup>a</sup>								
			třída 3	třída 4	třída 5	třída 3	třída 4	třída 5	třída 3 <sup>b</sup>	třída 4	třída 5
ruční	biopaliva	≤ 50	5 000	1 200	700	150	50	30	150	75	60
		> 50 ≤ 150	2 500			100			150		
		> 150 ≤ 500	1 200			100			150		
	fosilní paliva	≤ 50	5 000			150			125		
		> 50 ≤ 150	2 500			100			125		
		> 150 ≤ 500	1 200			100			125		
samočinná	biopaliva	≤ 50	3 000	1 000	500	100	30	20	150	60	40
		> 50 ≤ 150	2 500			80			150		
		> 150 ≤ 500	1 200			80			150		
	fosilní paliva	≤ 50	3 000			100			125		
		> 50 ≤ 150	2 500			80			125		
		> 150 ≤ 500	1 200			80			125		

Obr. 13: Tabulka s přehledem emisních požadavků na jednotlivé emisní třídy dle ČSN EN 303–5 [23]

## 6 Zpracování výsledků a vyhodnocení měření

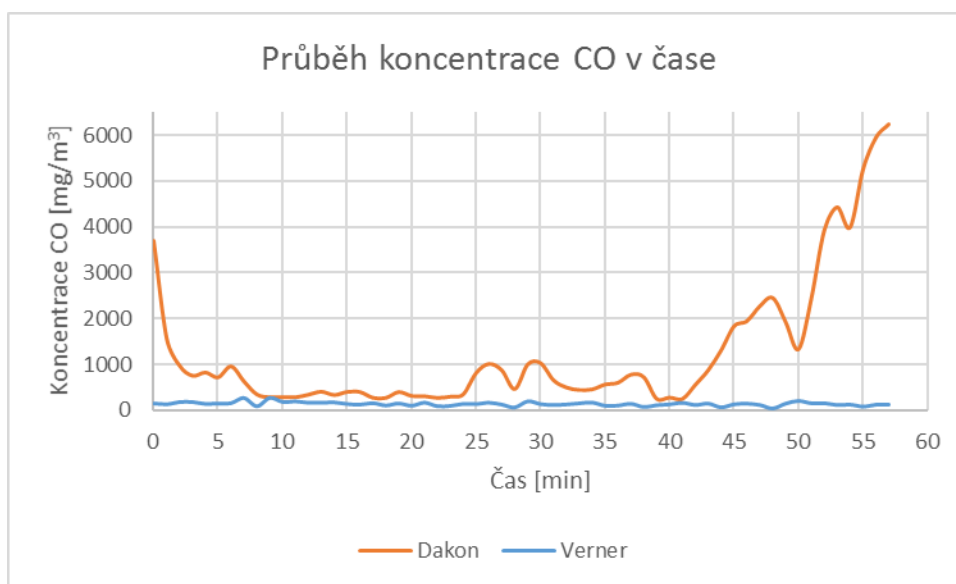
### 6.1 Porovnání emisí při spalování dřeva na dvou různých zařízeních

Prvním výstupem experimentální části této práce je porovnání plynných emisí oxidů dusíku a oxidu uhelnatého při spalování stejného materiálu na dvou různých spalovacích zařízeních. Konkrétně se jedná zplyňovací kotel Dakon Damat Pyro 20 G, kde bylo jako palivo použito štípaný buk o vlhkosti zhruba 8 % a peletový kotel Verner A251 s palivem v podobě dřevěných pelet typu A1 o průměru 6 mm.

Emise oxidu siřičitého nejsou v tomto případě porovnávány ze dvou prostých důvodů. Prvním důvodem je naprosto minimální (nebo dokonce žádný) obsah síry v palivu, a tudíž i minimální množství emisí oxidu siřičitého. Druhým důvodem je nepoužití vyhřívané hadice při měření na kotli Dakon z výše zmíněných důvodů – naměřené hodnoty emisí síry jsou v tomto případě zanedbatelné.

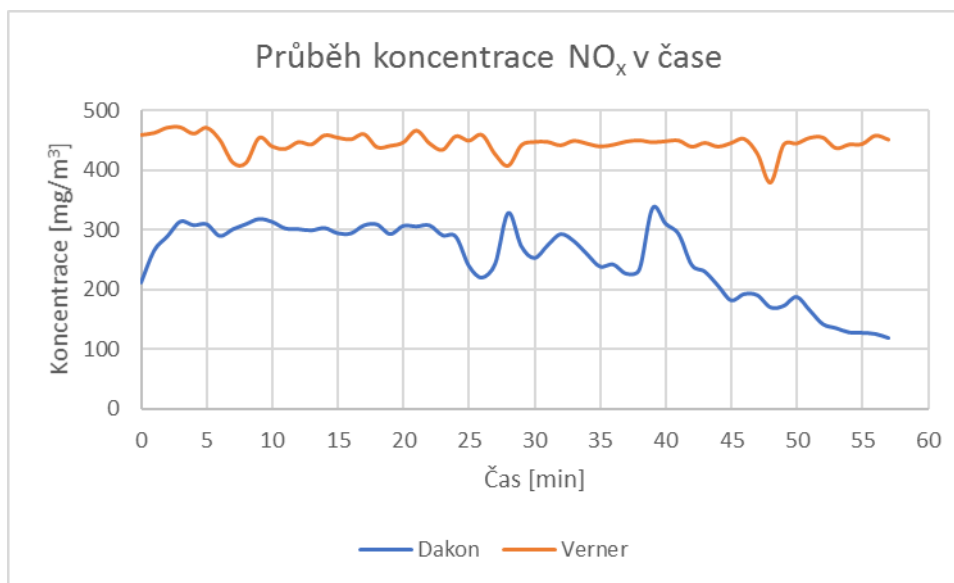
Koncentrace v průběhu celého měření jsou znázorněny v následujících grafech.

Graf č.1: Průběh koncentrace CO v čase



Z grafu vyplývá, že koncentrace oxidu uhelnatého u peletového kotle Verner má po celou dobu minimální výchylky, kdežto u zplyňovacího kotle Dakon tomu tak není. Ze začátku několik minut trvá, než se přiložené palivo správně rozhoří. Poté můžeme zhruba patnáct minut pozorovat relativně dobrý spalovací proces s podobnými emisemi jako u peletového kotle. Nicméně poté již dochází ke kolísání a následnému prudkému nárůstu emisí pravděpodobně z důvodu vyhoření většiny paliva (dřevo pouze dohořívá, případně jen doutná). V tomto případě by bylo vhodné provést další měření s mírnou úpravou podmínek, aby dřevo neshořelo tak rychle. Mezi takové změny může patřit například úprava množství kyslíku přiváděného do kotle nebo změna pozice přiloženého dřeva (např. místo dvou malých kusů dát jeden velký nebo položením co největší plochy na žhavý popel).

Graf č.2: Průběh koncentrace  $NO_x$  v čase



Z toho grafu je opět vidět, že v případě kotle Verner je průběh koncentrace relativně konstantní, kdežto u kotle Dakon dochází v posledních zhruba dvaceti minutách k jejímu mírnému poklesu. Tento pokles je stejně jako v případě emisí oxidu uhelnatého pravděpodobně spojen dohoříváním paliva a snižující se teplotu spalin.

Naměřené hodnoty emisí byly následně přepočítány na referenční hodnotu kyslíku 10 % podle vzorového výpočtu. Tyto výsledky jsou následně uvedeny v tabulce.

$$351,5 = 446,25 \cdot \left( \frac{21-10}{21-7,03} \right) NO_{x,REF} = NO_{x,MĚR} \cdot \left( \frac{21-O_{2,REF}}{21-O_{2,MĚR}} \right) \quad (7)$$

Tabulka č.8: Průměrné hodnoty jednotlivých emisí pro různá spalovací zařízení (a jejich paliv) vztahované k referenčnímu obsahu kyslíku

Zařízení	$NO_{x,REF}$ [mg/m <sup>3</sup> ]	$CO_{REF}$ [mg/m <sup>3</sup> ]
Verner A251	351,5	114,24
Dakon Damat Pyro 20 G	295,68	1468,52

Z tabulky je zřejmé, že zatímco emise oxidů dusíku jsou v obou případech relativně podobné, tak u emisí oxidu uhelnatého se řádově liší. Tento výrazný rozdíl bude pravděpodobně způsoben nedokonalostí spalovacího procesu. U peletového kotle je v případě správného nastavení kotle palivo dávkováno rovnoměrně po celou dobu měření a tím pádem nedochází k výrazným výkyvům ve spalovacím procesu. V případě zplyňovacího kotle se na začátku měření přiloží předem navážené množství paliva, které se následně nechá bez dalších zásahů hořet a tím pádem není možné docílit rovnoměrných podmínek pro celou dobu měření.

Oxid uhelnatý, jakožto produkt nedokonalého spalování, také částečně ovlivňuje účinnost daného zařízení. Jedná se vlastně o nespálený zbytek paliva a tím pádem energetickou ztrátu, která odchází v podobě oxidu uhelnatého do ovzduší [24]. Tato ztráta sice není nijak výrazná, nicméně účinnost kotle Dakon bude ovlivněna více, než účinnost kotle Verner.

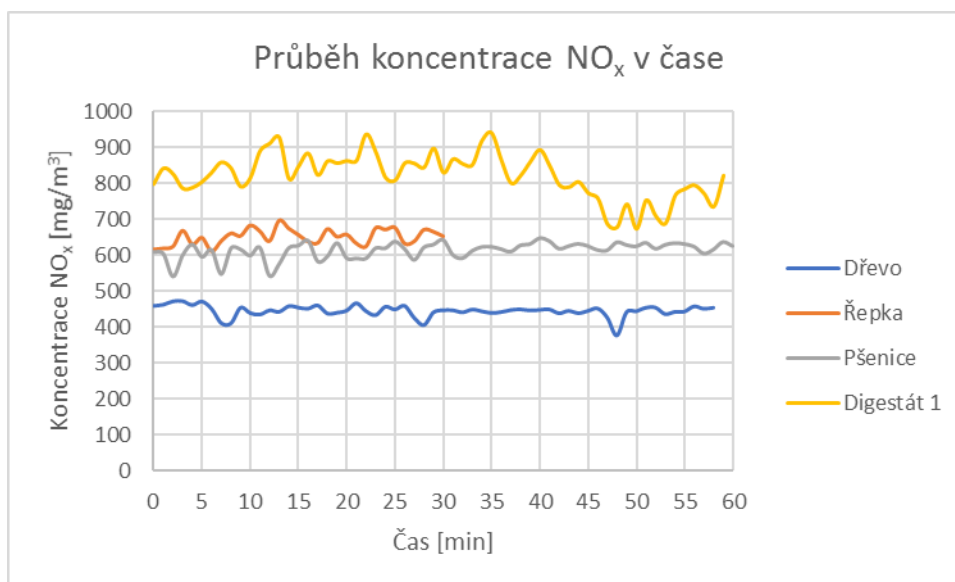
Z vypočítaných hodnot koncentrace oxidu uhelnatého v tabulce lze také určit, do jaké emisní třídy může daný kotel spadat. U kotle Verner byla vypočítána hodnota  $114,24 \text{ mg/m}^3$ . Podmínka pro nejvyšší třídu je koncentrace menší než  $500 \text{ mg/m}^3$  (viz Obr. 13), z toho vyplývá, že kotel Verner splňuje nejpřísnější podmínky a patří do 5. emisní třídy. Kotel Dakon, jakožto neautomatické zařízení, má sice méně přísné podmínky ( $700 \text{ mg/m}^3$  pro 5. emisní třídu), nicméně jeho vypočítaná hodnota je  $1468,52 \text{ mg/m}^3$ , což stačí na zařazení pouze do 3. emisní třídy. Určené emisní třídy souhlasí s třídami udávanými výrobcí jednotlivých zařízení. Pro přesné určení emisní třídy by ovšem bylo nutné znát i další potřebné hodnoty emisí.

## 6.2 Porovnání emisí na kotli Verner A251 pro různé druhy pelet

Ve druhé části bylo porovnáno množství vzniklých emisí oxidů dusíku a oxidu uhelnatého v závislosti na druhu paliva. Emise oxidu siřičitého nebyly měřeny ze stejných důvodů, jako v předchozí podkapitole. Jako palivo byly použity pelety z různých materiálů a rozdílných průměrů. Konkrétně se jedná o dřevěné pelety o průměru 6 mm, agropelety z řepky a pšenice, oboje o průměru 10 mm a také pelety z digestátu o průměru 6 mm. V případě digestátu byla provedena dvě měření, označená jako Digestát 1 a Digestát 2.

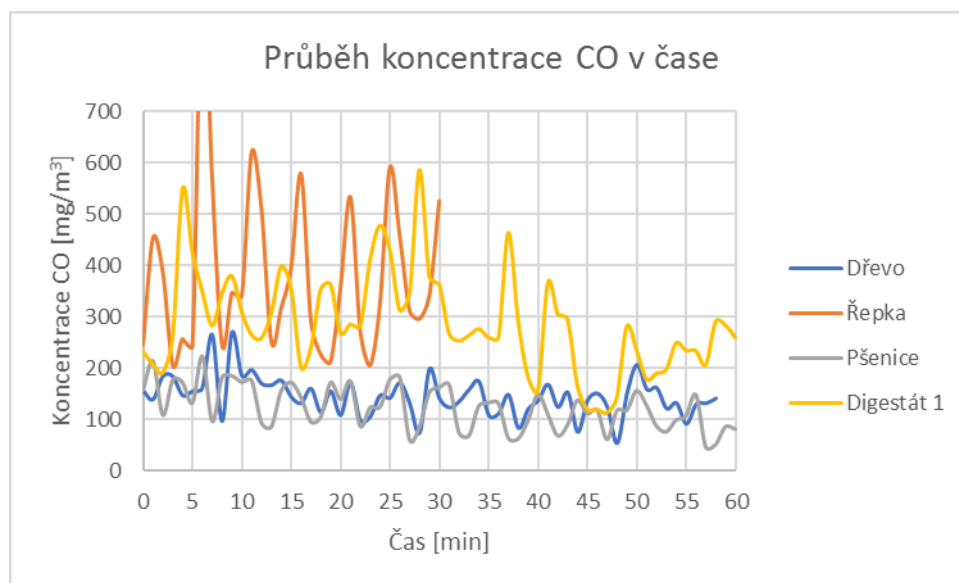
Průběhy koncentrací po celé měření jsou opět znázorněny v následujících grafech.

Graf č.2: Průběh koncentrací  $\text{NO}_x$  v čase





Graf č.3: Průběh koncentrace CO v čase



Z obou přiložených grafů je vidět, jak konstantní jednotlivé průběhy byly a z toho posoudit, zda dané měření probíhalo správně. V případě použití dřevěných a pšeničných pelet vidíme, že jak průběhy oxidů dusíku, tak průběhy oxidu uhelnatého jsou relativně konstantní po celou dobu měření. Hodnoty v jednotlivých průbězích se zde liší maximálně o několik desítek  $\text{mg}/\text{m}^3$ . Z těchto průběhů lze usoudit, že v době měření nedocházelo k zásadním výkyvům v procesu spalování (např. prudký nárůst nebo pokles obsahu kyslíku v kotli) a s nimi spojených případných výchytek v průbězích jednotlivých koncentrací.

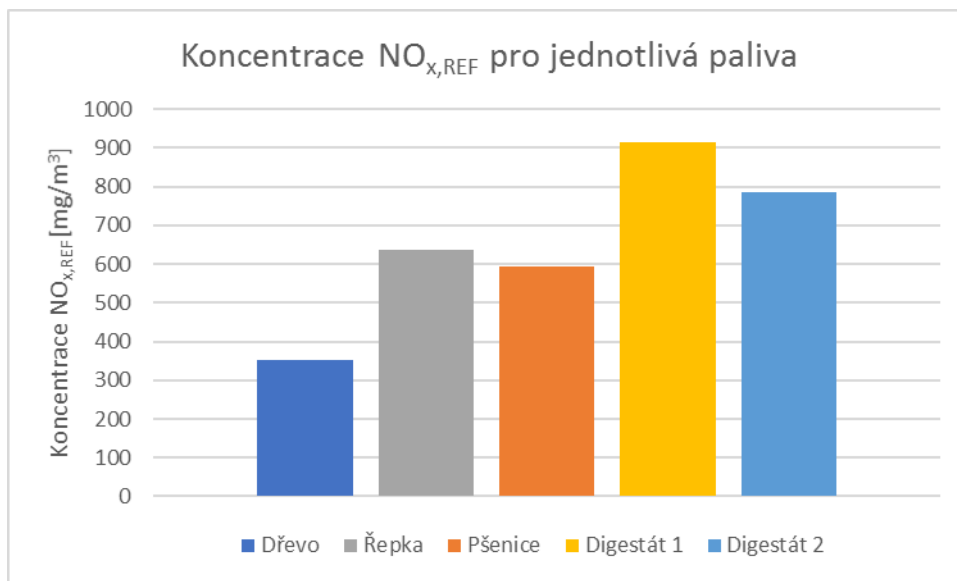
U pelet z řepky a digestátu lze opět vyčíst relativně stabilní průběh koncentrací u oxidů dusíku, nicméně v případě oxidu uhelnatého jsou tyto výkyvy už značné. Tyto výchytky byly pravděpodobně způsobeny špatným nastavením kotle pro konkrétní druh paliva a s ním spojená horší kvalita spalovacího procesu.

Doba měření u řepkových pelet byla zkrácena na poloviční dobu z důvodu nedostatku paliva.

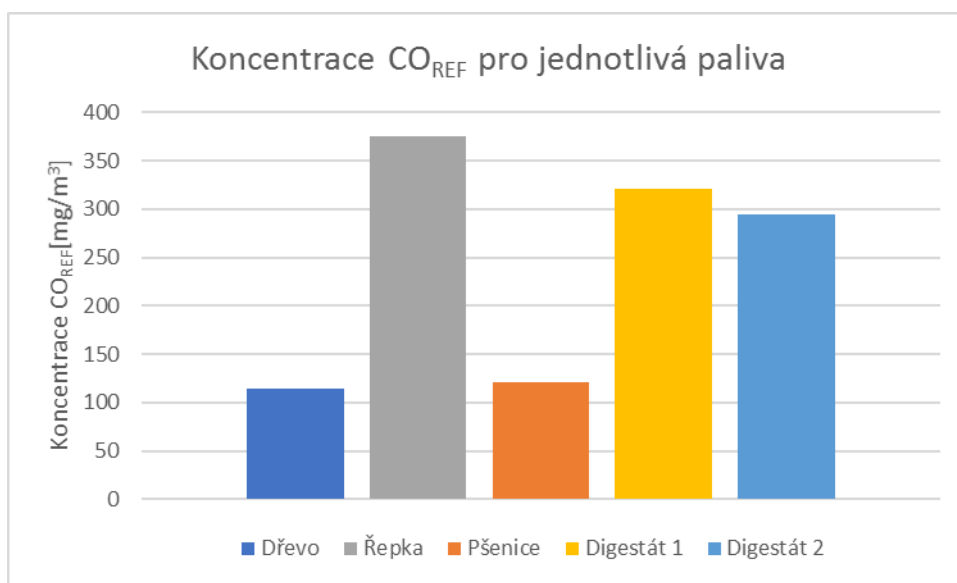
Průběh emisí z druhého měření digestátu nebyl znázorněn v přiložených grafech kvůli chybě, která je popsána v následující podkapitole.

Naměřené hodnoty emisí byly následně přepočítány na referenční hodnotu obsahu kyslíku 10 % podle vztahů (6) a (7). Tyto výsledky jsou pro větší názornost zpracovány do sloupcových grafů.

Graf č.4: Koncentrace  $NO_{x,REF}$  pro jednotlivá paliva



Graf č.5: Koncentrace  $CO_{REF}$  pro jednotlivá paliva

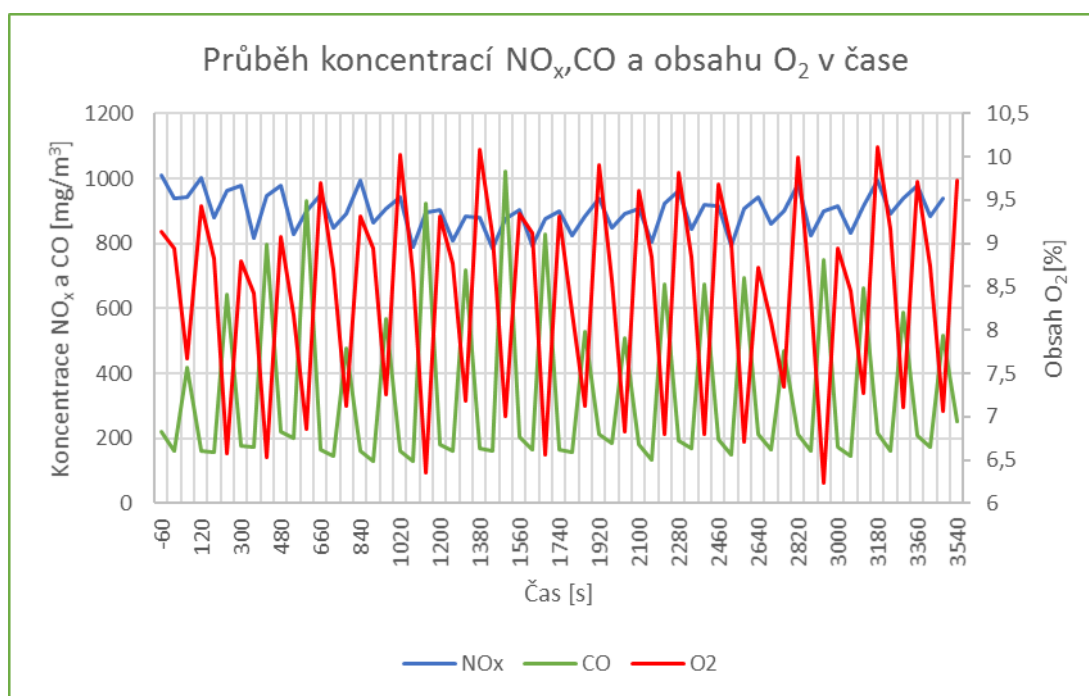


Z grafu vyplývá, že nejmenší hodnoty emisí pochází v obou případech z dřevěných pelet. Lehce horších výsledků dosáhly pelety pšeničné, ale u dalších druhů paliv už jsou vidět relativně velké rozdíly v jednotlivých koncentracích. Tyto výsledky budou pravděpodobně způsobeny nastavením kotle na spalování dřeva a s tím spojené zhoršené hodnoty u ostatních druhů paliv. Ovšem i přes některé zhoršené výsledky se všechna měřená paliva dostala pod hodnotu  $500 \text{ mg/m}^3$ , což znamená, že splňují podmínky pro 5. emisní třídu.

### 6.3 Závislost koncentrací oxidů dusíku a oxidu uhelnatého na množství kyslíku

Pro znázornění této závislosti paradoxně použijeme nevyužitě chybné měření z předcházející kapitoly. Problémem pravděpodobně bylo částečné ucpání přívodu vzduchu do kotle kvůli nedohořelým zbytkům pelet nebo velkému množství popela. V praxi tato situace vypadá tak, že větší množství kyslíku je do kotle přivedeno pouze při pohybu roštu, který byl pro toto měření nastaven v intervalu tří minut (viz kapitola Popis experimentu). Závislost jednotlivých koncentrací na množství kyslíku je znázorněna v přiloženém grafu.

Graf č.6: Závislost koncentrací oxidů dusíku a oxidu uhelnatého na množství kyslíku



Z grafu vyplývá, že každé tři minuty dojde k prudkému nárůstu množství kyslíku vlivem pohybu roštu a poté následuje jeho pomalejší spalování. Zmíněné změny obsahu kyslíku výrazně ovlivňují průběhy koncentrací jednotlivých spalín. Z teoretické části víme, že oxidy dusíku vznikají v přímé závislosti na množství kyslíku ve spalovacím procesu. Z grafu vidíme, že v místech lokálních minim obsah kyslíku se nachází také lokální minima koncentrace oxidů dusíku.

V případě oxidu uhelnatého je tomu přesně naopak a lokální minima jeho koncentrace se nachází v lokálních maximech obsahu kyslíku. Z toho vyplývá potvrzení dříve uvedené informace, konkrétně že oxid uhelnatý je produktem nedokonalého spalování, tzn. spalování s nedostatkem kyslíku.

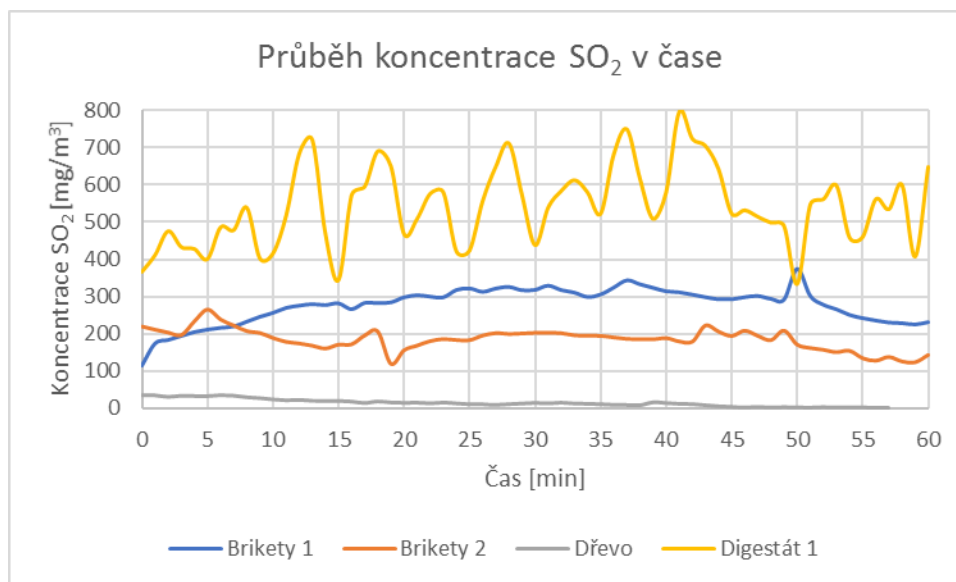
Při zpětném pohledu do sloupcových grafů na konci předcházející kapitoly můžeme vidět, že druhé měření digestátu ukázalo lehce zlepšené hodnoty obou měřených koncentrací i přes zmíněnou chybu. Z toho lze konstatovat, že nastavení kotle pro druhé měření bylo pro dané palivo lepší a v případě eliminace zmíněné chyby by tyto hodnoty mohly být ještě výrazně nižší.

#### 6.4 Porovnání emisí oxidu siřičitého pro jednotlivá paliva

Závěrečným výstupem experimentální části je porovnání emisí oxidu siřičitého pro jednotlivá paliva. Tyto emise závisí pouze na množství síry obsažené v palivu a nelze je ovlivnit spalovacím procesem, a tím pádem ani zařízením, ve kterém je spalování prováděno. Pro toto měření byly opět použity hodnoty z kotle Dakon Damat Pyro 20 G s palivem v podobě hnědouhelných briket<sup>4</sup> a štípaného buku a také z kotle Verner A251, konkrétně pelety z digestátu o průměru 6 mm. U ostatních měření bohužel nebyla použita vyhřívaná hadice, tudíž nemáme reálné hodnoty koncentrací síry.

Průběhy koncentrací po celé měření jsou opět znázorněny v následujícím grafu.

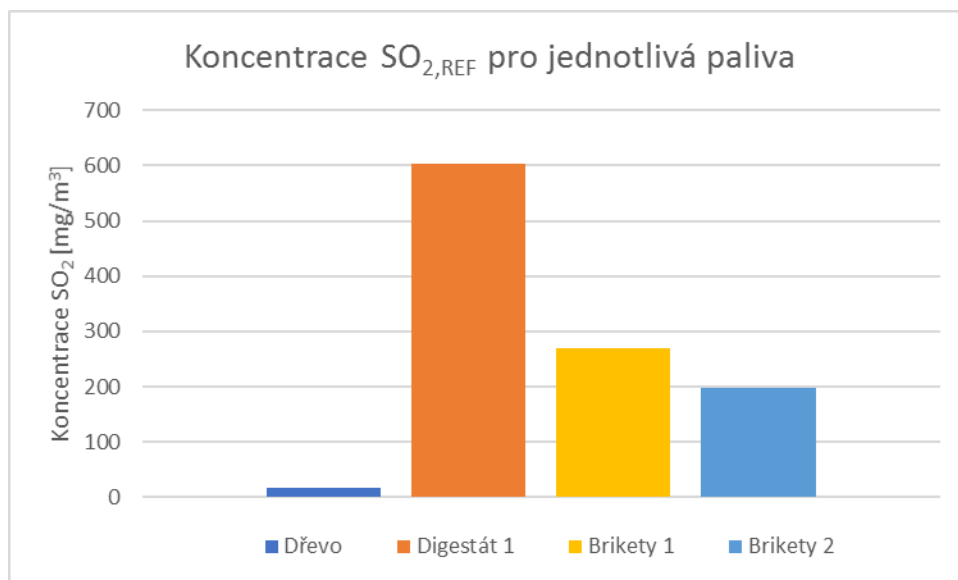
Graf č. 7: Průběh koncentrace  $SO_2$  v čase



<sup>4</sup> Hnědé uhlí nespádá do paliv z biomasy, nicméně pro názorné porovnání jsou jeho hodnoty použitelné.

Naměřené hodnoty emisí byly následně opět přepočítány na referenční hodnotu obsahu kyslíku 10 % podle vztahů (6) a (7) a zpracovány do grafu.

Graf č.8: Koncentrace oxidu siřičitého v jednotlivých palivech



Předpoklad byl, že nejvíce emisí oxidu siřičitého se bude vytvářet při spalování briket, nicméně z grafu vidíme, že nejvyšší množství emisí se vytváří v digestátu, zhruba o 400 mg/m<sup>3</sup> méně vzniká při spalování hnědouhelných briket. Při spalování dřeva vzniklo pouze stopové množství emisí, které se dá v porovnání s ostatními považovat za zanedbatelné.

## 7 Závěr

Cílem práce bylo seznámení čtenáře s plynnými emisemi vznikajícími při spalování biomasy a následně jejich určení na konkrétních spalovacích zařízeních. Práce lze proto pomyslně rozdělit na část teoretickou (rešeršní) a část experimentální.

V rešeršní části práce byly postupně popsány jednotlivé plynné emise, případně sloučeniny s nimi úzce související. Mezi plynné emise patří oxidy dusíku ( $\text{NO}_x$ ), oxid siřičitý ( $\text{SO}_2$ ) a oxid uhelnatý ( $\text{CO}$ ). Na úvod byl čtenář seznámen s jejich fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Následovaly dopady na zdraví člověka a životní prostředí. U člověka se nejčastěji projevují dýchacími obtížemi, na životní prostředí mají nejhorší vliv kyselá deště a fotochemický smog. Na závěr byly popsány základní mechanismy vzniku a následné likvidace těchto emisí, které je možné dosáhnout pomocí primárních a sekundárních opatření. Primární opatření (použitelné u oxidů dusíku a oxidu uhelnatého) spočívají v úpravě spalovacího procesu tak, aby tyto emise vznikaly co nejméně, kdežto sekundární opatření (oxidy dusíku a oxid siřičitý) je likvidace již vzniklých emisí, nejčastěji pomocí různých chemických procesů.

V úvodu experimentální části práce je nejdříve popsán ukázkový průběh jednoho z měření včetně základních informací o nejdůležitějších měřících přístrojích. Také je zde uvedena metodika výpočtu použitá k vyhodnocení výsledků, která spočívá v přepočtu naměřených hodnot vzhledem k referenční hodnotě obsahu kyslíku.

Hlavní část této práce se zabývá zpracováním konkrétních měření a vyhodnocením jejich výsledků. Cílem prvního měření bylo porovnání zplyňovacího kotle Dakon Damat Pyro 20 G s peletovým kotlem Verner A251 za použití dřeva jako paliva. Z tohoto porovnání vyšel mnohem lépe kotel Verner, který splnil podmínku pro zařazení do páté emisní třídy dle normy ČSN EN 303-5, kdežto výsledek kotle Dakon stačil pouze na zařazení do třetí emisní třídy. Obě změřené emisní třídy se také shodovaly s třídami uvedenými výrobcem jednotlivých zařízení. Další část porovnává vzniklé množství emisí pro několik různých druhů paliv při spalování na stejném spalovacím zařízení – kotli Verner A251. Nejlepšího výsledku zde dosáhly dřevěné pelety, nicméně výsledek ostatních paliv mohl být ovlivněn špatným nastavením zařízení pro dané palivo. Ovšem všechna paliva splnila podmínku pro zařazení do páté emisní třídy. Ve třetí části byla na jednom nekvalitním měření ukázána závislost vzniku oxidů dusíku a oxidu uhelnatého na množství kyslíku. Z této závislosti vyplývá, že s rostoucím množstvím kyslíku roste i obsah oxidů dusíku. U oxidu uhelnatého je tomu přesně naopak, tzn. s rostoucím obsahem kyslíku klesá množství oxidu uhelnatého ve spalinách, nicméně v případě velkého množství kyslíku může klesat i účinnost zařízení. V poslední části byly krátce porovnány emise oxidu siřičitého u některých paliv. Z důvodu kondenzování oxidu siřičitého bez použití vyhřívané hadice nebyla tato data dostupná pro všechna měření. Překvapivým zjištěním bylo, že koncentrace emisí oxidu siřičitého z digestátu byla zhruba dvojnásobná v porovnání s hnědouhelnými briketami.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HEMERKA, Jiří a Pavel VYBÍRAL. *Ochrana ovzduší*. V Praze: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 978-800-1046-463.
- [2] Oxid dusnatý. In: *Wikipedie* [online]. 2018 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid\\_dusnat%C3%BD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid_dusnat%C3%BD)
- [3] Oxid dusičitý. In: *Wikipedie* [online]. 2018 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid\\_dusi%C4%8Dit%C3%BD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid_dusi%C4%8Dit%C3%BD)
- [4] BENEŠOVÁ, Marika, Hana SATRAPOVÁ a Hana SATRAPOVÁ. *Odmaturuj! z chemie*. Brno: Didaktis, c2002. ISBN 80-862-8556-1.
- [5] Oxidy dusíku. In: *Integrovaný registr znečišťování* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.irz.cz/node/79>
- [6] Oxidy dusíku. In: *Integrovaný registr znečišťování* [online]. [cit. 2018-02-26]. Dostupné z: <http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=slovník&id=104>
- [7] VEJVODA, Josef, Pavel MACHAČ a Petr BURYAN. *Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2003. ISBN 80-708-0517-X.
- [8] Chemické složení pevných paliv s obsahem vody do 15 %. In: *TBZ-INFO* [online]. [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/115-chemicke-slozeni-pevnych-paliv-s-obsahem-vody-do-15>
- [9] Ochrana ovzduší [online]. [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: <https://old.vscht.cz/uchop/udalosti/skripta/1ZOZP/ovzdusi/viden.htm>
- [10] Oxid siřičitý. In: *Wikipedie* [online]. 2018 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid\\_si%C5%99i%C4%8Dit%C3%BD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid_si%C5%99i%C4%8Dit%C3%BD)
- [11] Oxid sírový. In: *Wikipedie* [online]. 2018 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid\\_s%C3%ADrov%C3%BD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid_s%C3%ADrov%C3%BD)
- [12] Oxidy síry. In: *Integrovaný registr znečišťování* [online]. [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: 9. [https://www.irz.cz/repository/latky/oxidy\\_siry.pdf](https://www.irz.cz/repository/latky/oxidy_siry.pdf)
- [13] Kyselý déšť: Ničí lesy, zabíjí ryby a přináší také Alzheimerovu chorobu. In: *Čti doma* [online]. 2017 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: <http://www.ctidoma.cz/zpravodajstvi-zdravi/2017-05-03-kysely-dest-nici-lesy-zabiji-ryby-prinasi-take-alzheimerovu-chorobu>
- [14] Síra. In: *Elektronická učebnice* [online]. [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/2332>
- [15] HEMERKA, Jiří a František HRDLIČKA. Emise z kotelen a ochrana ovzduší (I). In: *TZB-info* [online]. Praha, 2004 [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/2294-emise-z-kotelen-a-ochrana-ovzdusi-i>
- [16] Oxid uhelnatý. In: *Wikipedie* [online]. 2018 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid\\_uhelnat%C3%BD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid_uhelnat%C3%BD)
- [17] Oxid uhličitý. In: *Wikipedie* [online]. 2018 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid\\_uhli%C4%8Dit%C3%BD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid_uhli%C4%8Dit%C3%BD)
- [18] Oxid uhelnatý. In: *Integrovaný registr znečišťování* [online]. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: [https://www.irz.cz/repository/latky/oxid\\_uhelnaty.pdf](https://www.irz.cz/repository/latky/oxid_uhelnaty.pdf)
- [19] Oxidy uhlíku. In: *Skupina ČEZ* [online]. 1999 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: [https://www.cez.cz/ede/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/oxid\\_uhlik.html](https://www.cez.cz/ede/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/oxid_uhlik.html)
- [20] SMATANOVÁ, Michaela. Digestát jako organické hnojivo. In: *EAGRI* [online]. 2012 [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: [http://eagri.cz/public/web/file/233740/Digestat\\_jako\\_organicke\\_hnojivo.pdf](http://eagri.cz/public/web/file/233740/Digestat_jako_organicke_hnojivo.pdf)

- [21] Kotel Verner A251. In: *Verner* [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://www.kotle-verner.cz/produkty/automaticke-kotle/verner-a251#tab3>
- [22] HEMERKA, Jiří a František HRDLIČKA. Emise z kotelen a ochrana ovzduší (III). In: *TZB-info* [online]. Praha, 2005 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/2309-emise-z-kotelen-a-ochrana-ovzdusi-iii>
- [23] Kotle emisní třída 5. In: *Gas komplet – moderní tepelná technika* [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://www.mujkotel.cz/kotle-emisni-trida-5/>
- [24] NOSKIEVIČ, Pavel. Účinnost spalovacích zařízení. In: *Výzkumné energetické centrum* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://vec.vsb.cz/katalog-obrazku/clanek-115/197-ucinnost-1.pdf>



## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
$k_1$	Konstanta změřená při spalování zemního plynu	—
$k_2$	Konstanta změřená při spalování zemního plynu	$K$
$T$	Termodynamická teplota	$K$
$t$	Čas	$s$
$pH$	Vodíkový exponent	—
$S_m$	Měrná sirtatost paliva	$g_{siry}/MJ$
$S_p$	Hmotnost síry v původním palivu	%
$Q_r$	Výhřevnost paliva v původním stavu	$MJ/kg$
$C_{REF}$	Výsledná koncentrace přepočítaná na referenční obsah kyslíku	$mg/m^3$
$C_{MĚR}$	Naměřená koncentrace	$mg/m^3$
$O_{2,REF}$	Zvolená hodnota referenčního obsahu kyslíku	%
$O_{2,MĚR}$	Naměřený obsah kyslíku	%
$NO_{x,REF}$	Výsledná koncentrace oxidů dusíku přepočítaná na referenční obsah kyslíku	$mg/m^3$
$NO_{x,MĚR}$	Naměřená koncentrace oxidů dusíku	$mg/m^3$
$CO_{REF}$	Výsledná koncentrace oxidu uhelnatého přepočítaná na referenční obsah kyslíku	$mg/m^3$
<b>Zkratka</b>	<b>Celý název</b>	
UV	Ultrafialové (záření)	
ČR	Česká republika	

## SEZNAM CHEMICKÝCH SLOUČENIN A PRVKŮ

<b>Značka</b>	<b>Název</b>
NO	Oxid dusnatý
NO <sub>2</sub>	Oxid dusičitý
N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxid dusitý
N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Oxid dusičný
HNO <sub>3</sub>	Kyselina dusičná
HNO <sub>2</sub>	Kyselina dusitá
O	Radikál kyslíku
N	Radikál dusíku
OH <sup>-</sup>	Hydroxylový radikál
H	Radikál vodíku
O <sub>2</sub>	Kyslík
N <sub>2</sub>	Dusík
SO <sub>2</sub>	Oxid siřičitý
SO <sub>3</sub>	Oxid sírový
H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	Kyselina siřičitá
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Kyselina sírová
CO	Oxid uhelnatý
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý
ΣC <sub>x</sub> H <sub>y</sub> (OGC)	Nespálené uhlovodíky
C	Uhlík