

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
Fakulta strojního inženýrství  
Ústav procesního inženýrství

**Ing. Bc. Jiří Bojanovský**

**SPALOVÁNÍ TUHÝCH PALIV V ROTAČNÍ PECI A VLIV JEJICH  
SLOŽENÍ NA TVORBU ZNEČIŠŤUJÍCÍCH LÁTEK**

COMBUSTION OF SOLID FUELS IN ROTARY KILN AND THE INFLUENCE  
OF THEIR COMPOSITION ON EMISSIONS

Zkrácená verze dizertační práce

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství

Školitel: doc. Ing. Vítězslav Máša, Ph.D.

Oponenti: doc. Ing. Zdeněk Jegla, Ph.D.  
Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně  
Technická 2896, 616 69 Brno

Ing. Radim Puchýř, Ph.D.  
EVECO Brno, s.r.o.  
Březinova 1608/42, 616 00 Brno

Datum obhajoby: 29. září 2022

**Key words**

Rotary kiln, alternative fuel, sewage sludge, biomass, RDF, co-firing, fouling

**Klíčová slova**

Rotační pec, alternativní palivo, čistírenský kal, biomasa, TAP, spoluspalování, zanášení

**Místo uložení dizertační práce**

Ústav procesního inženýrství, FSI, VUT v Brně

© Jiří Bojanovský, 2022

*Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě strojního inženýrství. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.*

## Obsah

1	Úvod a motivace práce .....	1
2	Cíle práce a použité metody .....	1
3	Současný stav poznání .....	2
4	Příprava a popis experimentálního zařízení .....	3
5	Formulace metodiky měření a příprava experimentu.....	5
5.1	Postup výzkumných činností .....	5
5.2	Metodika experimentu.....	6
5.3	Alternativa k experimentálnímu přístupu.....	7
6	Výsledky.....	8
6.1	Představení vybraných paliv a směsí .....	8
6.2	Materiálová bilance .....	11
6.3	Výpočet tepelného zatížení rotační pece.....	11
6.4	Provozní parametry a kvalita spalování .....	12
6.5	Vyhodnocení emisní tvorby – O <sub>2</sub> , CO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , TOC, HCl, HF a NH <sub>3</sub> .....	16
6.6	Vyhodnocení tvorby TZL .....	19
6.7	Posouzení zanášení teplosměnných ploch .....	21
6.8	Srovnání odhadovaných a reálně naměřených emisí.....	22
7	Komplexní vyhodnocení a doporučení do praxe .....	24
8	Závěr .....	26
	Použitá literatura .....	28
	Curriculum Vitae .....	29
	Abstrakt.....	30

# 1 Úvod a motivace práce

tlak na snižování závislosti na fosilních palivech vede k hledání alternativních zdrojů energie. Pokud zaměříme pozornost na dostupná alternativní paliva, nabízí se zejména biomasa, čistírenský kal (ČK) nebo tuhá alternativní paliva (TAP). TAP mají původ v průmyslové výrobě nebo se jedná o určité složky tříděného komunálního odpadu. Právě větší energetické využití alternativních paliv namísto fosilních zdrojů energie je hlavní motivací této práce. Čistírenský kal i TAP jsou relativně nenákladná paliva, se kterými je v každém případě zapotřebí nějak nakládat či je zpracovat. Termické zpracování je vhodným způsobem nakládání s těmito zdroji energie. Naproti tomu biomasa je na rozdíl od TAP nebo ČK obnovitelným zdrojem energie. Její spalování lze teoreticky považovat za uhlíkově neutrální proces. V reálných podmínkách však i spalování biomasy vykazuje určitou uhlíkovou stopu.

Z legislativního hlediska jsou čistírenský kal (ČK) i TAP stále odpady. V rámci zjednodušení je o těchto odpadech v předkládané práci pojednáváno jako o palivech. Spalování výše zmíněných paliv v současných spalovacích zařízeních přináší provozní problémy například v podobě zvýšené koroze spalovacího zařízení a spalinových cest. Dalšími negativními důsledky spalování alternativních paliv v běžných spalovacích zařízeních může být tvorba nápeků na teplosměnných plochách, slinování popelu, kontaminace slínku v cementárenské výrobě atd. Tyto negativní vlivy zpřičinují snížení účinnosti zařízení, zvyšují provozní náklady nebo snižují životnost zařízení. Přesto je spalování alternativních paliv perspektivní směr s velkým přesahem do budoucna.

Předkládaná dizertační práce se zabývá studiem vlivu složení paliva na tvorbu znečišťujících látek. **Cílem práce je specifikovat vhodnou směs alternativních paliv pro uplatnění v průmyslové praxi s ohledem na emisní tvorbu a zanášení potrubních tras.** Zvolenou metodikou naplnění hlavního cíle práce je ověření studovaného vlivu na základě experimentálního ověření v poloprovozní rotační peci, která je využívána pro výzkumné a komerční aktivity na Ústavu procesního inženýrství FSI VUT v Brně. K vyhodnocení tohoto vlivu bylo navrženo, vyrobeno a nainstalováno nové zkušební zařízení umístěné přímo ve spalinové cestě z rotační pece. Toto zařízení se skládá z usazovací komory a trubkového chladiče.

Vhodná volba palivové směsi povede k minimalizaci tvorby úsad ve spalinových cestách a tím k zachování účinnosti přenosu tepla. Zvýšení účinnosti spalovacích zařízení je klíčové pro snížení ekologické zátěže těchto procesů. Navrhovaná opatření jsou proveditelná bez větších investičních nákladů s cílem snížit provozní náklady.

Vstupními hypotézami, na které odpovídá představovaná dizertační práce, jsou:

1. Na základě složení tuhého paliva lze předpovědět tvorbu znečišťujících látek.
2. Složení směsi tuhého paliva lze zvolit tak, aby došlo ke snížení tvorby znečišťujících látek.

## 2 Cíle práce a použité metody

**Hlavním cílem práce je specifikovat vhodnou směs alternativních paliv pro uplatnění v průmyslové praxi s ohledem na emisní tvorbu a zanášení potrubních tras.** Jedná se o vysoce aktuální problematiku, neboť současné trendy spějí

ke spalování několika druhů paliv současně za účelem snížení závislosti na spalování fosilních paliv.

K důkladnému ověření vhodné volby těchto cílů slouží první dílčí cíl, který lze shrnout jako popis současného stavu poznání. Na jeho základech byly formulovány další dílčí cíle práce. K provedení experimentální části práce v podobě spalovacích zkoušek bylo zapotřebí přizpůsobit původní experimentální zařízení. Úprava spočívala v instalaci nové experimentální jednotky skládající se z usazovací komory a trubkového chladiče. Tato dvě zařízení jsou nově umístěna přímo do původní spalínové cesty vedoucí z rotační pece. Tato zařízení jsou schopna vyhodnotit míru tvorby znečišťujících látek. Dalším krokem po montáži jednotky byla formulace metodiky měření. Dále byl sestaven harmonogram zkoušek, požadavky na lidské zdroje během experimentů a byly stanoveny podmínky, za kterých proběhlo měření experimentálních dat.

Následuje vyhodnocení experimentálních dat, komplexní zhodnocení provozních poznatků a doporučení pro praxi. Na základě zjištěných poznatků jsou formulovány hlavní výsledky, zodpovězeny vstupní hypotézy a vydána doporučení pro praxi.

### **3 Současný stav poznání**

Současným trendem je odklon od spalování fosilních paliv. Vedle tlaku na snížení spotřeby, zvýšení míry recyklace atp., se jedná také o náhradu fosilních paliv těmi obnovitelnými/alternativními. Za povšimnutí stojí fakt, že odpadní pneumatiky, plasty či průmyslový odpad nemohou být chápány jako obnovitelný zdroj energie, neboť nesnižují produkci CO<sub>2</sub>. Obnovitelným zdrojem energie je například biomasa [1]. Jedná se však o alternativní paliva, která jsou vhodnou náhradou fosilních zdrojů energie.

Spalování komunálních odpadů probíhá v drtivé většině v roštových kotlích nebo v kotlích s fluidním ložem [2]. Rotační pece jsou s výhodou používány tehdy, kdy je potřeba spalovat různé typy paliv (v rotační peci lze spalovat tuhá, kapalná i plynná paliva) nebo dosáhnout vyšších spalovacích teplot (až 1400 °C) [3]. Příkladem průmyslových aplikací rotačních pecí v České republice může být spalovna průmyslových odpadů v podniku Deza, a.s. ve Valašském Meziříčí, spalovna nebezpečných odpadů SUEZ CZ a.s. v Ostravě a Trmicích a spalovna nebezpečných odpadů EKOTERMEX, a.s. ve Vyškově.

Čistírenský kal je prozatím nejvíce využíván v rostlinné výrobě. Z důvodu plánovaných legislativních opatření je nutné najít vhodný způsob nakládání s ČK. Jako nejvíce perspektivní se jeví jeho termické zpracování. Rotační pec v tomto procesu hraje díky vysokým provozním teplotám klíčovou roli. Z tohoto důvodu je studium vlivu složení paliva na tvorbu znečišťujících látek aktuální a akutní problematikou.

TAP jsou pro podmínky ČR definována normou ČSN EN ISO 21637. Tato paliva jsou připravována z odpadů (jedná se například o specifický odpad z výroby, tříděný tuhý komunální odpad, průmyslový odpad, čistírenský kal atp.), které nejsou klasifikovány jako nebezpečné. Jejich využití je ve spalovnách, případně ve spalovacích zařízeních [4].

Spalování alternativních paliv v rotačních pecích v cementárnách je již zavedenou praxí. V České republice bylo provedeno několik provozních zkoušek spalování alternativních paliv na kotlích ve vybraných elektrárnách a teplárnách. Zkoušenými palivy byla mimo jiné biomasa, certifikovaný TAP z průmyslového a tříděného komunálního

odpadu, případně čistírenský kal. Jedná se o důležitý zdroj provozních zkušeností, ze kterých vychází a dále je rozvíjí předkládaná dizertační práce.

Pro řadu energetických společností v České republice je spoluspalování více různých druhů paliv zajímavé. Společnost Veolia Energie ČR plánuje zmodernizovat teplárnu Karviná a vybudovat v ní multipalivový kotel. Mimo tento projekt jsou plánovány i další modernizace stávajících zařízení s cílem nově spalovat TAP. Příkladem může být teplárna v Přerově [5] nebo zkoušky spoluspalování TAP (do 10 hm. %) ve fluidních kotlích ve stávajících elektrárnách Tisová, Hodonín a Poříčí [6]. Plzeňská teplárenská má od roku 2011 povoleno spoluspalovat TAP, biomasu a hnědé uhlí [7].

Spoluspalování uhlí a biomasy je náchylné k vyššímu obsahu částic pod 1  $\mu\text{m}$  ve spalinách. V porovnání se spalováním samotného uhlí jsou tyto částice výrazně menší, což ovlivňuje účinnost odlučovačů těchto částic [8]. Častým biopalivem je dřevní štěpka, ale používají se i zemědělské produkty (sláma, otruby, seno, slupky, oříšky) nebo další energetické plodiny (šřovík, laskavec, topolovka, mužál). Tyto plodiny mají ve srovnání s dřevními štěpkami vyšší obsah chlóru [9]. Sami a kol., 2001 [10] uvádí, že spoluspalování biomasy s uhlím vykazuje při 22 % zastoupení biomasy dvojnásobné zvýšení koroze.

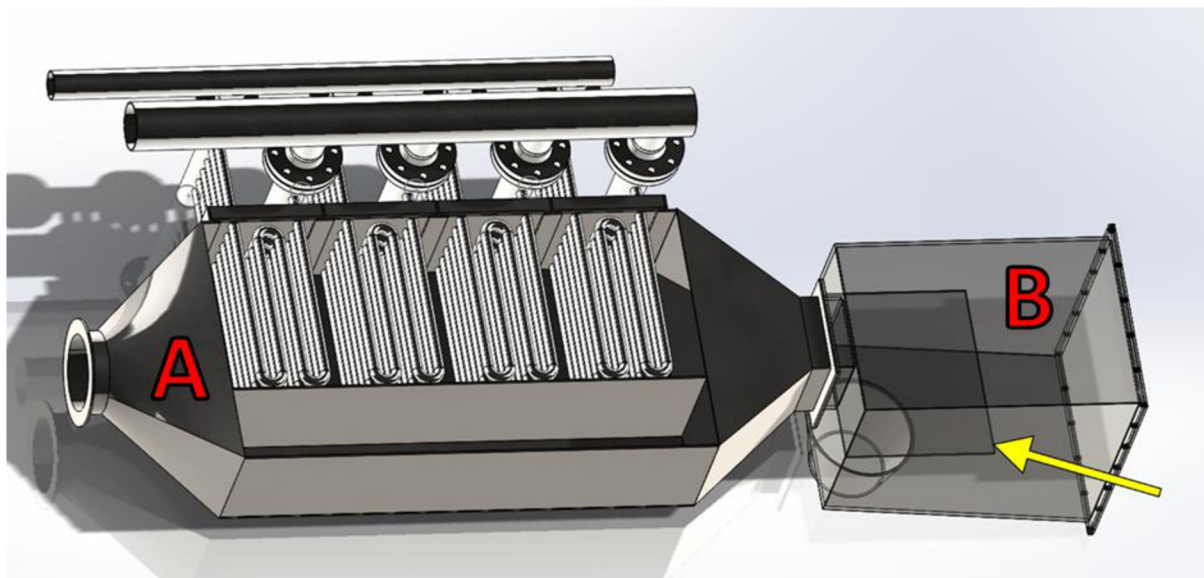
Současným hlavním trendem energetického a odpadového hospodářství je náhrada fosilních paliv a potřeba efektivní a ekologické likvidace odpadu. Proto přicházejí nová paliva, která vytvářejí nežádoucí znečišťující látky. Tato výzva je společným jmenovatelem všech VaV trendů. Zároveň nejsou dostupné žádné systematictější výsledky výzkumu vlivu složení paliva na tvorbu znečišťujících látek při spalování v rotačních pecích. Z tohoto důvodu se na tuto problematiku zaměřuje předkládaná práce. Na základě provedené rešerše byla vybrána paliva vhodná pro spalovací zkoušky experimentální části této práce. Typově se jedná o TAP z průmyslových i komunálních odpadů, peletizovaný čistírenský kal a biomasu ve formě lesního odpadu. Jako referenční palivo bylo zvoleno hnědé uhlí.

Výše uvedená rešerše byla použita jako základ odborného článku „Rotary Kiln, a unit on the border of the process and energy industry – current state and perspectives: review“, který bude vydán v časopisu Sustainability.

## **4 Příprava a popis experimentálního zařízení**

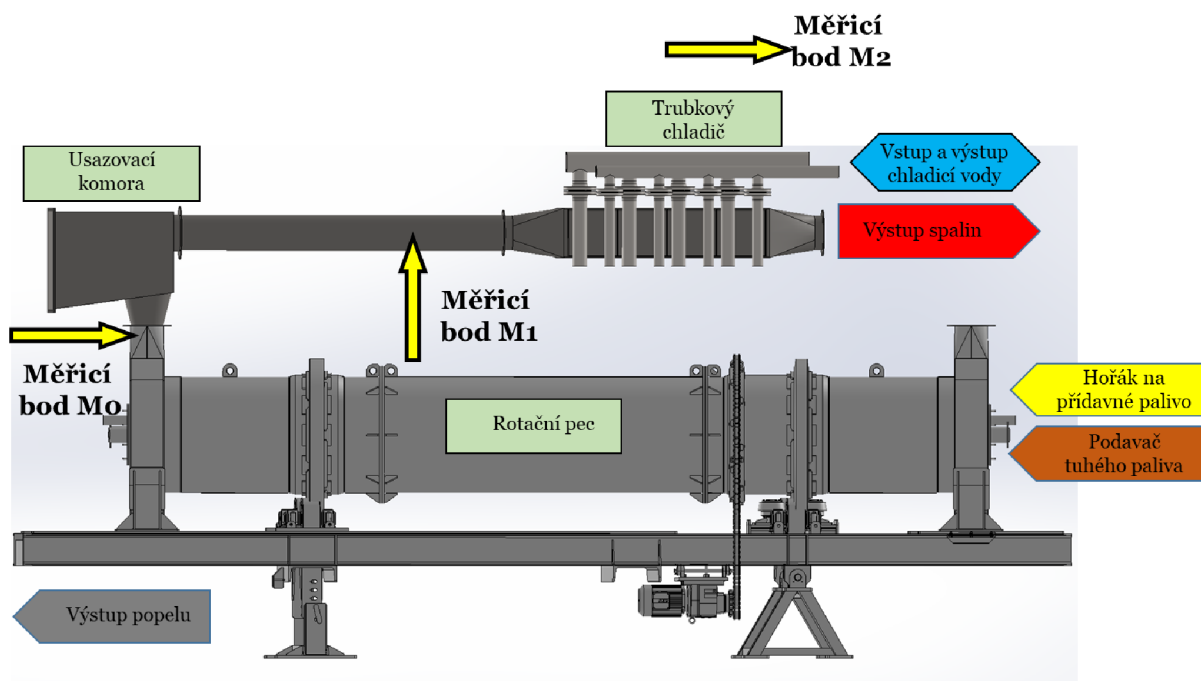
Experimentální zařízení se nachází ve Zkušebně hořáků a rotačních pecí Ústavu procesního inženýrství FSI VUT v Brně. Jedná se o rotační pec o délce 5 m a vnitřním průměru spalovací komory 400 mm. Toto zařízení bylo k dispozici ještě před zahájením příprav pro tuto dizertační práci. Pro účely spalovacích zkoušek souvisejících s touto dizertační prací byl spalinový systém doplněn usazovací komorou a trubkovým chladičem spalin včetně potřebného příslušenství. Na úpravě experimentálního zařízení se podílelo několik pracovníků odborné Sekce navrhování a simulace tepelných zařízení a procesů a Sekce termických procesů a čištění plynů. Autor se spolupodílel na finálním řešení konstrukce obou navrhovaných zařízení, řešil s dodavatelem proces výroby a zajišťoval koordinaci prací při montáži zařízení. Autor dále zajišťoval výběr, nákup a instalaci měřicí techniky.

Konstrukce usazovací komory a trubkového chladiče je patrná na Obr. 1. Tato komora je označena písmenem A. Přepážku sloužící k zachytávání TZL (její poloha je označena žlutou šipkou) lze umístit do 3 poloh. Tyto polohy se liší vzdáleností přepážky od ústí do usazovací komory.



Obr. 1 Konstrukce trubkového chladiče (A) a usazovací komory (B)

Trubkový chladič spalin, který je na Obr. 1 označen písmenem A, se nachází na potrubní trase za usazovací komorou. Chladič je do spalinové trasy umístěn, aby **simuloval přítomnost reálného zařízení pro výměnu tepla**. Chladič je navržen s ohledem na jeho účel, tedy vyhodnocení míry zanášení na teplosměnných plochách. To je umožněno pomocí tří inspekčních otvorů. Tyto otvory/měřicí body se nacházejí před usazovací komorou, mezi komorou a chladičem a za chladičem (viz Obr. 2). Díky tomu je lze vyhodnotit účinnost usazování částic TZL v usazovací komoře i určení míry tvorby nálepu na trubkách spalinového chladiče.



Obr. 2 Schéma poloprovozní technologie použité při experimentech

## **5 Formulace metodiky měření a příprava experimentu**

Plán experimentu byl sestaven s ohledem na stanovené cíle dizertační práce. Nejprve je zařazen do širšího rámce výzkumné činnosti (kapitola 5.1) a následně je podrobněji popsána metodika experimentu (kapitola 5.2). V ní jsou stanoveny podmínky, za kterých proběhly spalovací zkoušky. V poslední podkapitole 5.3 je představen alternativní přístup k řešení úlože vycházející z metod numerického modelování.

### **5.1 Postup výzkumných činností**

Celkový rámec výzkumné a vývojové činnosti lze seřadit do několika základních kroků:

#### **I. Analýza současného stavu poznání**

Kvalitní zhodnocení současného stavu poznání je zcela zásadní pro vhodné stanovení hlavního cíle práce. Díky této analýze lze identifikovat aktuální mezery ve výzkumu a perspektivní trendy, které budou v budoucnu nepostradatelné. Odklon od fosilních paliv a snaha maximalizovat energetické využití odpadů/minimalizovat míru skládkování jsou hlavním trendem ve zkoumané oblasti a současně hlavní motivací této práce. Analýza současného stavu poznání byla předmětem kapitoly 3.

#### **II. Stanovení hypotéz a hlavního cíle práce**

První hypotéza je formulována jako: „Na základě složení tuhého paliva lze předpovědět tvorbu znečišťujících látek.“, zatímco druhá zní: „Složení směsi tuhého paliva lze zvolit tak, aby došlo ke snížení tvorby znečišťujících látek.“ Diskuse těchto hypotéz je nezbytná pro naplnění hlavního cíle, jenž je: Specifikace vhodné směsi alternativních paliv pro uplatnění v průmyslové praxi s ohledem na emisní tvorbu a zanášení potrubních tras.

#### **III. Formulace metodiky experimentu**

Metodice experimentu se podrobně věnuje následující kapitola 5.2., kde jsou blíže popsány jednotlivé kroky experimentální činnosti a specifikovány podmínky měření.

#### **IV. Realizace experimentu**

- a. Volba paliv
- b. Palivové analýzy
- c. Provedení spalovacích zkoušek jednotlivých paliv
- d. Volba palivových směsí
- e. Provedení spalovacích zkoušek palivových směsí

Experimentální část práce lze rozdělit na její samotnou realizaci a její vyhodnocení. Jako perspektivní alternativní paliva byla zvolena čistírenský kal, tuhé alternativní palivo TAP a čerstvý lesní odpad. Jako referenční palivo bylo zvoleno hnědé uhlí. S těmito palivy již existují určité provozní zkušenosti, jsou na trhu dostupné a jejich spoluspalování v průmyslových podmínkách má velký potenciál (doloženo v kapitole 3). Na základě dílčích poznatků budou sestaveny vhodné palivové směsi.

#### **V. Vyhodnocení experimentu**

- a. Vyhodnocení provozních poznatků
- b. Výpočet materiálové bilance a výpočet tepelného zatížení rotační pece
- c. Vyhodnocení tvorby plyných emisí a emisí TZL
- d. Analýza kritických míst teplosměnných ploch



#### e. Srovnání odhadovaných a reálně naměřených plynných emisí i emisí TZL

Vyhodnocení experimentu lze rozdělit do několika výše uvedených oblastí. Jedná se o jednotlivé na sebe navazující kroky. Ty jsou sestaveny tak, aby byly schopny zodpovědět hlavní výzkumné otázky. Jedná se zejména o posouzení platnosti nulové hypotézy, že „Složení tuhého paliva nemá vliv na tvorbu znečišťujících látek při jeho spalování v rotační peci.“.

### **VI. Komplexní vyhodnocení a doporučení do praxe**

Na základě vyhodnocení dílčích výsledků jsou formulovány hlavní závěry a doporučení pro průmyslovou praxi. Doporučená palivová směs pro průmyslové využití je detailně diskutována z hlediska jejich výhod a provozních rizik.

### **VII. Diskuse výsledků**

Ve finální části práce jsou diskutovány hlavní poznatky z poloprovozních testů z hlediska jejich vypovídající hodnoty a budoucího navázání výzkumných aktivit. Dále jsou shrnuty výhody a nevýhody testovaných palivových směsí.

## **5.2 Metodika experimentu**

Metodika měření musí být sestavena s ohledem na opakovatelnost experimentu s cílem odpovědět na základní hypotézy dizertační práce. Validace dat získaných během spalovacích zkoušek je doporučena provedením provozního experimentu na jiném spalovacím zařízení při dosažení srovnatelných provozních podmínek.

Samotnou realizaci experimentu lze rozdělit do několika na sebe navazujících kroků:

### **I. Volba paliv**

Pro spalovací zkoušky bylo vybráno 5 alternativních paliv a jedno referenční palivo. Jedná se o 2 druhy čistírenského kalu lišících se ročním obdobím produkce, 2 druhy TAP se zcela odlišným původem a fyzikálně-chemickými vlastnostmi, čerstvý lesní odpad a hnědé uhlí. Bližší charakteristiku včetně výsledků palivových analýz uvádí kapitola 6.1.

### **II. Palivové analýzy**

Palivové analýzy proběhly dle norem v laboratořích ÚPI FSI VUT v Brně. Analyzován byl obsah vlhkosti, popelovin a hořlavin. V rámci prvkové analýzy byl zjištěn obsah uhlíku, vodíku, dusíku, prchavé síry a kyslíku. Obsah kyslíku byl stanoven výpočtem jako teoretická hodnota.

### **III. Provedení spalovacích zkoušek jednotlivých paliv**

Aby bylo možné vyhodnotit vlastnosti jednotlivých paliv, spalovací zkoušky proběhly nejprve samostatně. Na základě dílčích výsledků byly následně sestaveny palivové směsi a provedeny spalovací zkoušky s těmito směsmi. Bližší podmínky, za kterých proběhly spalovací zkoušky jsou uvedeny níže v této kapitole.

### **IV. Volba palivových směsí**

Na základě výsledků dílčích palivových zkoušek bylo definováno 6 perspektivních palivových směsí. Poměrové zastoupení složek směsi bylo stanoveno na základě

hmotnostního procenta. Dvě z definovaných směsí obsahují biomasu, ostatní směsi se liší hmotnostním podílem TAP : KAL.

## V. Provedení spalovacích zkoušek palivových směsí

Spalovací zkoušky s palivovými směsmi proběhly za srovnatelných podmínek jako zkoušky s dílčími palivy. Podmínky, za kterých tyto zkoušky proběhly, souhrnně popisuje zbývající část této kapitoly.

Plán experimentu musí být sestaven jako 6 poloprovozní testů pro samostatná paliva a 6 testů pro jejich směsi. Každý experiment musí vykazovat stabilní podmínky v řádu několika hodin. Stabilní provozní podmínky lze identifikovat pomocí teplot uvnitř rotační pece.

**Hlavním výstupem experimentální činnosti jsou graficky vykreslené závislosti emisní tvorby na složení paliva.** Jednotlivé emise naměřené v příslušných bodech spalovací trasy jsou vykresleny do sloupcových grafů (**viz kapitola 6.5**). Toto zobrazení poskytuje dobrý přehled o závislosti generovaných emisí a typu spalovaných paliv.

Jednou ze základních metod popisu spalovací technologie je vyhodnocení její materiálové bilance. Pro účely této práce je využita zjednodušená rovnice zohledňující pouze toky tuhých látek (viz rovnice 1):

$$\dot{m}_{\text{tuhé palivo}} = \dot{m}_{\text{popel}} + \dot{m}_{\text{popílek}} \quad (1)$$

Toky popelu (tuhý zbytek odcházející gravitací na dně rotační pece) a popílku (drobné částice popelu odcházející z rotační pece spolu se spaliny) jsou měřeny pomocí laboratorních vah na základě hmotnostního přírůstku. Popel je sbírán z ocelové nádoby umístěné na konci pece, zatímco popílek je sbírán z nádoby umístěné pod rukávovým filtrem. Analýza popelu a popílku musí obsahovat stanovení míry nedopalu, na jejímž základě lze hodnotit kvalitu spalování. V rámci materiálové bilance je sestavena také měrná produkce popelu v závislosti na spalovaném palivu. Jedná se o množství produkovaného popelu vztáženého na množství dávkovaného paliva. Dále je proveden výpočet tepelného zatížení rotační pece vycházející z jednotlivých vstupních energetických toků (tuhé palivo + přídavný zemní plyn).

První hypotézu „Na základě složení tuhého paliva lze předpovědět tvorbu znečišťujících látek“ lze vyhodnotit na základě srovnání odhadovaných a reálně naměřených emisí při spalování palivových směsí (kapitola 6.8). Odhadované emise vychází z emisních hodnot naměřených při spalování dílčích složek paliv samostatně na základě pákového pravidla. Příklad: Při spalování paliva A byly naměřeny emise  $\text{SO}_2$  100 mg/m<sup>3</sup>, zatímco při spalování paliva B byly tyto emise nulové. U palivové směsi skládající se z těchto dvou paliv 1:1 je odhadováno, že výsledné emise  $\text{SO}_2$  budou 50 mg/m<sup>3</sup>. Jakmile jsou odhadované emise shodné nebo velmi se blíží reálně naměřeným emisím, lze konstatovat, že první hypotéza je pravdivá.

### 5.3 Alternativa k experimentálnímu přístupu

Alternativou k navrženému experimentálnímu výzkumu mohou být metody numerického modelování na bázi CFD (Computational Fluid Dynamics). Z hlediska povahy problému se obecně jedná o simulace vícefázového proudění v rotující doméně a s přítomností chemických reakcí a přenosem energie radiací. Výhodami detailního modelování procesu

spalování je mimo jiné možnost získat informace o prostorovém rozložení koncentrací produktů spalování. Těmi jsou CO, CO<sub>2</sub>, případně další plynné znečišťující látky jako NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> atd. Dále jsou modely schopné zobrazit prostorové rozložení teplot či vypočítat lokální intenzitu přestupu tepla. To je výhodné zejména při návrhu a optimalizaci spalovacích zařízení. Výhodou numerických metod je také možnost analyzovat spalování různých druhů paliv za jinak neměnných podmínek. Díky tomu lze s vyšší přesností zkoumat vliv složení paliva na tvorbu znečišťujících látek s omezením vlivu vnějších podmínek. Dosažení neměnných provozních podmínek je při poloprovozních spalovacích zkouškách obtížné. Naproti tomu nevýhodou detailního numerického modelování na bázi CFD je obtížnost zadání vstupních dat, a to zejména v případě heterogenních směsí paliv, jakými jsou například odpady. Numerické modely vyžadují nejen kvalitní palivovou analýzu, ale i znalost velikosti, geometrie a struktury částic paliva. Tyto vlastnosti definují rychlost dílčích dějů termické přeměny jednotlivých složek palivové směsi.

## 6 Výsledky

Rozsáhlá experimentální činnost, která přinesla výsledky popsané v této kapitole, probíhala průběžně v letech 2017 až 2022. Postup zkoušek vycházel z metodiky experimentu (kapitola 5.2) s ohledem na opakovatelnost zkoušek a možnost validace naměřených dat.

Zopakujeme výchozí výzkumné hypotézy této DDP:

1. Na základě složení tuhého paliva lze předpovědět tvorbu znečišťujících látek.
2. Složení směsi tuhého paliva lze zvolit tak, aby došlo ke snížení tvorby znečišťujících látek.

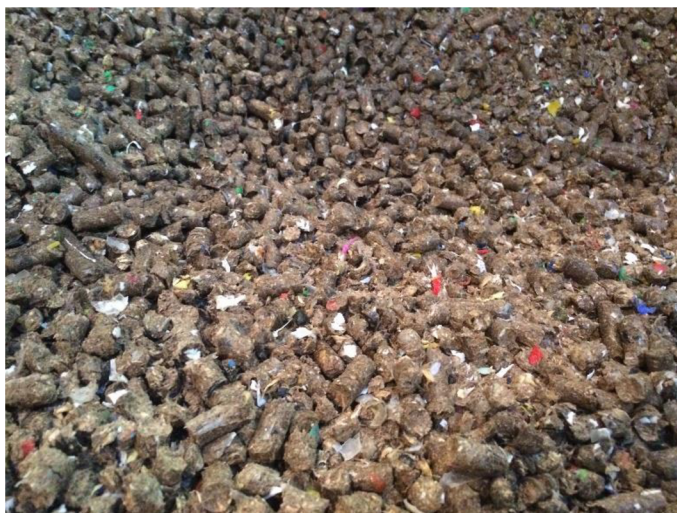
### 6.1 Představení vybraných paliv a směsí

Tato kapitola představuje parametry jednotlivých testovaných paliv. Jedná se o hnědé uhlí, TAP 1 a TAP 2, zimní KAL 1, letní KAL 2 a lesní odpad. Z hlediska legislativy není čistírenský kal a TAP palivem. V rámci zjednodušení jsou však v této práci všechny spalované látky nazývány palivem. Kromě těchto dvou typů paliv (přesněji řečeno odpadů) bylo jako referenční palivo zvoleno právě hnědé uhlí, zatímco jako zástupce biopaliv byl zvolen čerstvý lesní odpad. Výsledky palivových analýz souhrnně představuje Tab. 1.

Tab. 1 Výsledky palivové analýzy dílčích palivových složek

	<b>Hnědé uhlí</b>	<b>TAP 1</b>	<b>TAP 2</b>	<b>KAL 1</b>	<b>KAL 2</b>	<b>Lesní odpad</b>
Voda [% hm.]	26,8	15,6	0,1	7,0	6,4	39,7
Popel [% hm.]	4,7	6,8	3,8	33,6	40,7	0,3
Hořlavina [% hm.]	68,6	77,6	96,2	59,4	52,9	60,0
Výhřevnost [MJ.kg <sup>-1</sup> ]	19,3	13,9	28,1	13,7	12,1	9,7
Uhlík C [% hm.]	50,9	37,8	64,3	31,8	28,1	30,2
Vodík H [% hm.]	7,0	7,1	8,8	5,4	4,9	8,1
Dusík N [% hm.]	0,7	1,5	0,2	4,6	3,7	0,1
Síra prchavá S [% hm.]	0,5	0,1	0,1	1,6	1,4	0,0
Kyslík O [% hm.]	36,4	46,7	23,0	22,8	21,2	61,4

Tuhé alternativní palivo TAP 1 bylo vyrobeno z tříděného komunálního odpadu (ze žlutých popelnic) města Jilemnice a bylo peletizováno. Kvůli nízké soudržnosti částic bylo palivo zpevněno 30 % biosložky (plevy). Délka peletek se pohybuje od 5 do 30 mm viz Obr. 3.



Obr. 3 Palivo TAP 1 – tříděný plastový komunální odpad s biosložkou

Palivo TAP 2 (viz Obr. 4) bylo zakoupeno od společnosti FCC Česká republika, s. r. o., provozovna Brno. Jedná se o palivo z průmyslových odpadů s komerčním názvem ASAPAL, které je certifikováno pro využití v cementárenských pecích. Jeho složení je garantováno a doloženo dodavatelem. Hlavní složkou paliva je tzv. "tapezierung", textilní výplň z automobilové výroby.



Obr. 4 Jednotlivé frakce paliva TAP 2, vzorek číslo 1

Dalším testovaným palivem byl KAL 1, který byl vyprodukován v prosinci roku 2020. Právě obdobím vzniku se KAL 1 liší od paliva KAL 2, které bylo vyprodukováno v červnu 2021. Oba zmíněné kaly pochází z čističky odpadních vod v Karlových Varech, která zpracovává pouze komunální vody. Oba čistírenské kaly mají zvýšený obsah síry a dusíku.

Lesní odpad pochází z lesů z okolí Vlašimi a jedná se o směs čerstvě zpracované dřevní štěpky, kůry, jehličí a rašeliny. Tento odpad vzniká při lesní těžbě a obsahuje velké množství vody (přibližně 50 %).

## Palivové směsi

Jakmile proběhly spalovací zkoušky s dílčími palivy, bylo možné přistoupit k návrhu jejich směsí. Při sestavování směsí byl kladen důraz zejména na inovativnost výběru. Z tohoto důvodu bylo upuštěno od v provozu již testovaných směsí, jakou je například směs skládající se z 90 hm. % z hnědého uhlí a z 10 hm. % z čistírenského kalu. Z tohoto důvodů byla nejprve definována perspektivní směs tvořená třemi dílčími palivy. Zástupcem biopaliv byl lesní odpad a zástupci alternativních paliv byly TAP a KAL. Takto vznikla směs MIX 1. U dalších 4 směsí byl kladen důraz na alternativní paliva bez obsahu biopaliv. U těchto směsí se lišilo hmotnostní zastoupení TAP a KAL v rozsahu od 90 do 20 hm. % TAP. Palivová směs MIX 6 se poměrově skládá ze stejných složek jako směs MIX 1 s rozdílem ve složce tuhého alternativního paliva TAP a KAL. Ve směsi MIX 1 se nachází složka TAP 1 a KAL 1, zatímco ve směsi MIX 6 se nachází složka TAP 2 a KAL 2. Zásadní rozdíl je zejména u TAP. TAP 1 obsahuje přibližně 30% bio složky, pochází z komunálního odpadu a bylo peletizováno, zatímco palivo TAP 2 se skládá pouze z průmyslového odpadu a peletizováno či nějak aditivováno nebylo. Porovnání provozních charakterů těchto dvou palivových směsí má velkou vypovídací hodnotu. Obě tyto směsi lze považovat za dostupné. Náhrada fosilních zdrojů energie právě těmito směsmi má obrovský komerční potenciál. Složení všech palivových směsí je uvedeno v Tab. 2.

Tab. 2 Složení palivových mixů dle hmotnostních procent dílčích složek paliv

	<b>TAP 1</b>	<b>KAL 1</b>	<b>TAP 2</b>	<b>KAL 2</b>	<b>Lesní odpad</b>
MIX 1	20	10	-	-	70
MIX 2	-	-	90	10	-
MIX 3	-	-	70	30	-
MIX 4	-	-	50	50	-
MIX 5	-	-	20	80	-
MIX 6	-	-	20	10	70

V Tab. 3 se nachází souhrnná palivová analýza všech spalovaných směsí. Jak vyplývá z této tabulky, směsi MIX 1 a 6 mají velmi podobné složení.

Tab. 3 Výsledky palivové analýzy směsí dílčích složek paliv

	<b>MIX 1*</b>	<b>MIX 2</b>	<b>MIX 3</b>	<b>MIX 4</b>	<b>MIX 5</b>	<b>MIX 6</b>
Voda [% hm.]	31,6	0,2	0,9	1,0	5,6	33,0
Popel [% hm.]	4,9	5,9	10,7	12,3	28,1	5,0
Hořlavina [% hm.]	63,5	94,0	88,4	86,7	66,3	62,0
Výhřevnost [MJ.kg <sup>-1</sup> ]	11,0	27,3	25,2	25,9	13,0	14,2
Uhlík C [% hm.]	31,8	63,0	57,2	58,0	33,5	36,7
Vodík H [% hm.]	7,6	8,2	8,3	8,3	5,0	8,6
Dusík N [% hm.]	0,8	0,8	0,7	1,0	3,4	0,5
Síra prchavá [% hm.]	0,2	0,2	0,2	0,3	1,4	0,0
Kyslík O [% hm.]	54,6	22,0	22,9	20,0	28,5	49,2

\* Obsah vody, popelovin, výhřevnost atd. byl stanoven pákovým pravidlem na základě hodnot dílčích složek této směsi.

## 6.2 Materiálová bilance

Pro vyhodnocení materiálové bilance je využita zjednodušená rovnice zohledňující pouze toky tuhých látek (viz rovnice 1). Hmotnostní toky se v jednotlivých případech liší, neboť dávkování paliv bylo staveno na základě tepelného výkonu (výhřevnosti paliv jsou různé). Hodnoty popelovin vycházející z palivové analýzy však nejsou zcela totožné (viz Tab. 4) s hodnotami experimentálně zjištěné měrné produkce, k čemuž by v teoretické rovině mělo dojít. Srovnání v Tab. 4 je nutné interpretovat s vědomím, že data z palivové analýzy byla získána v laboratorních podmínkách a hodnoty popelu zahrnují kompletní obsah popelovin v palivu (tedy popel i popílek). Data ve třetím sloupci příslušné tabulky byla získána při poloprovozních spalovacích zkouškách, zahrnují pouze popel (popílek odešel spolu se spaliny do rukávcového filtru) a určitou roli hraje i chyba měření zanesená v důsledku tvorby úsad popílku ve spalinových trasách.

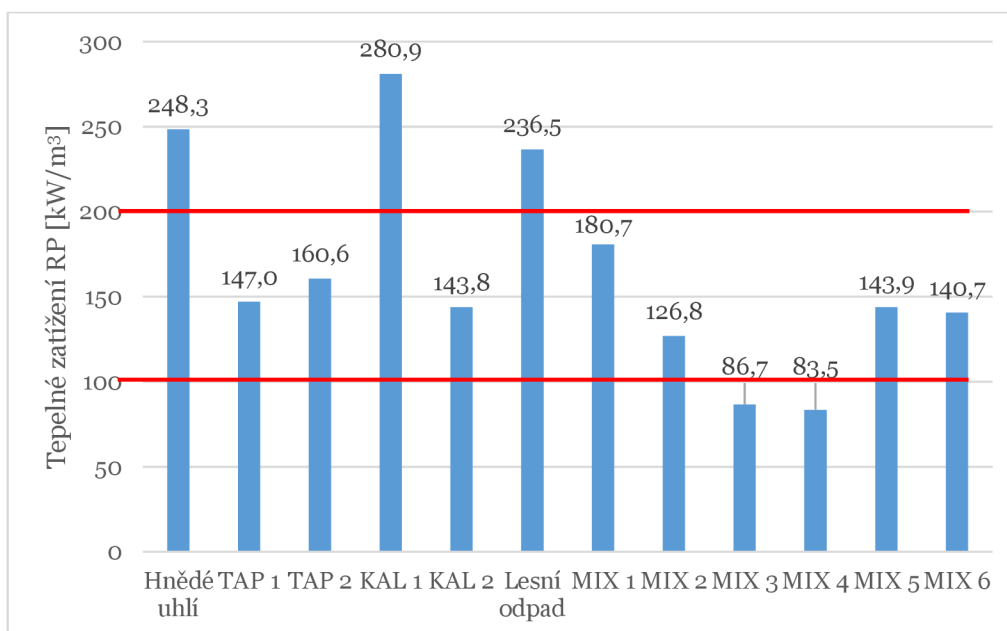
Výrazný nárůst produkce popelu o 136 % (viz Tab. 4) u hnědého uhlí souvisí s jeho nedostatečným dohořením. Pokles produkce popelu u TAP 1 TAP 2, KAL 1, lesního odpadu, případně MIX 1 a 2 je způsoben právě částečným úletem prachových částic ve formě popílku a tvorbou úsad v potrubním systému spalinových tras. Produkce popelu u paliv KAL 2 a směsí MIX 3 – 6 je srovnatelná s odhadovanou produkcí stanovenou na základě palivové analýzy. U směsí s vysokým zastoupením čistírenských kalů (např. MIX 5) je zřejmá zvýšená tvorba popelu.

Tab. 4 Srovnání měrné tvorby popelu s výsledky palivové analýzy

Palivo	Z palivové analýzy	Změřeno/zváženo	Odchylka
	kg popelu/kg paliva	kg popelu/kg paliva	%
<b>Hnědé uhlí</b>	0,047	0,110	136
<b>TAP 1</b>	0,068	0,018	-74
<b>TAP 2</b>	0,038	0,014	-62
<b>KAL 1</b>	0,336	0,048	-86
<b>KAL 2</b>	0,407	0,331	-19
<b>Lesní odpad</b>	0,003	0,000	-96
<b>MIX 1</b>	0,049	0,013	-73
<b>MIX 2</b>	0,059	0,030	-49
<b>MIX 3</b>	0,107	0,131	22
<b>MIX 4</b>	0,123	0,155	26
<b>MIX 5</b>	0,281	0,305	8
<b>MIX 6</b>	0,050	0,041	-17

## 6.3 Výpočet tepelného zatížení rotační pece

Výpočet tepelného výkonu pece vychází z doporučeného tepelného zatížení vztaženého na objem pece v kW/m<sup>3</sup>. Doporučený maximální/minimální tepelný výkon rotační pece je roven hodnotě 200/100 kW/m<sup>3</sup>. Jedná se o hodnoty, které byly určeny na základě dlouhodobých provozních zkušeností se spalováním průmyslových odpadů v rotačních pecích [11]. Srovnání doporučeného tepelného výkonu pece a jeho reálné naměřené hodnoty zobrazuje Obr. 5.



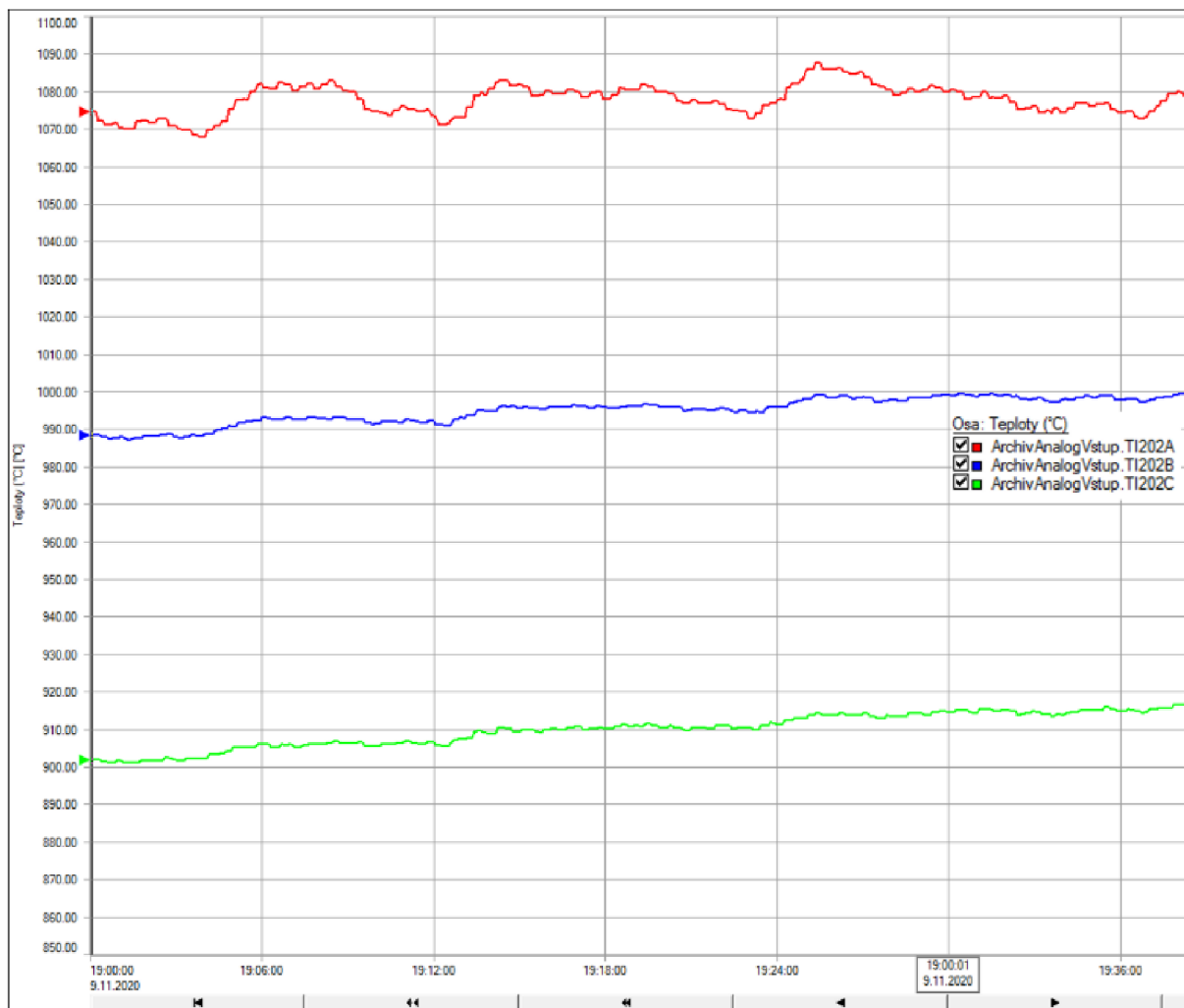
Obr. 5 Srovnání doporučeného (pásma mezi červenými linkami) a reálného tepelného zatížení rotační pece

Během části spalovacích zkoušek nebylo technologicky možné snížit výkon přídavného hořáku na zemní plyn pod 60 kW. Proto byl při spalování KAL 1 a lesního odpadu doporučený tepelný výkon pece překročen. Vzhledem k zanedbatelnému množství popelovin a vysoké vlhkosti, která posunula oblast vyšších teplot dál od čela pece, nebylo spalování lesního odpadu i při těchto tepelných výkonech nijak problematické. U KAL 1 došlo nejprve k výraznému růstu natavenin a po chvíli také k úplnému roztavení popelu, který způsobil nemalé provozní komplikace a v konečném důsledku i přerušení spalovacích zkoušek. Naopak při spalování palivových směsí MIX 3 a MIX 4 byl reálný tepelný výkon pece nižší než minimální doporučený. Pec byla podchlazená. Vlastnosti paliva neumožňovaly provoz přídavného hořáku na zemní plyn.

#### 6.4 Provozní parametry a kvalita spalování

Při spalování hnědého uhlí dosahovaly teploty v první části rotační pece (červená křivka) hodnoty 1075 °C, zatímco ve středu pece (modrá křivka) byly přibližně 1000 °C, a na jejím konci (zelená křivka) asi 910 °C viz Obr. 6. Dosažené spalovací podmínky byly stabilní a vyhovující.

Na základě teplotních profilů lze spalovací podmínky označit a uspokojivé, a tedy spalovací zkoušky za úspěšné. V druhé a třetí části rotační pece bylo dosaženo stabilních teplot ve všech případech, kolísající teploty v první části pece jsou důsledkem charakteru některých paliv a nesnižují věrohodnost naměřených dat.



Obr. 6 Teplotní profil při spalování hnědého uhlí

### Kvalita spalování – vyhodnocení míry nedopalu v popelu a popílku

Kvalitu spalování lze mimo jiné vyhodnotit na základě míry nedopalu v popelu a popílku vystupujícím z rotační pece. U obou těchto materiálových toků se sleduje hmotnostní procentuální zastoupení hořlavých látek, které nebyly při průchodu rotační peči spáleny. Podobně jako popel lze i popílek využít ke zhodnocení kvality spalování. S rostoucí mírou nedopalu v popílku roste tendence k zanášení spalinových tras těmito tuhými látkami. Proto je sledování tohoto parametru významné.

Nejprve byly provedeny spalovací zkoušky s hnědým uhlím. Z důvodu relativně velké frakce paliva (až 40 mm) a obecně nedostatečné distribuce spalovacího vzduchu v rotační peči byla zjištěna vysoká míra nedopalu. Přestože byla zdržná doba nastavena pomocí otáček a sklonu pece na maximální hodnotu, až 88,5 % paliva nebylo dostatečně spáleno. Problém s nedostatečným vyhořením paliva se však vyskytoval pouze u hnědého uhlí.



Tab. 5 Vyhodnocení vlhkosti a množství nedopalu v popelu a popílku [hm. %]

	Hnědé uhlí	TAP 1	TAP 2	KAL 1	KAL 2	Lesní odpad	MIX 1	MIX 2	MIX 3	MIX 4	MIX 6
vlhkost popelu	0,0	0,2	0,0	0,2	0,0	0,2	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0
nedopal v sušině popelu	88,5	0,1	0,0	0,2	0,3	0,5	10,6	0,1	0,1	0,1	0,0
vlhkost popílku	-	-	1,0	-	3,6	-	-	1,5	2,2	1,7	-
nedopal v sušině popílku	-	-	21,8	-	14,2	-	-	29,1	65,9	58,9	-

*U buněk označených „-“, měření nedopalu/ vlhkosti neproběhlo*

Pro analýzu nedopalu v popílku byla vybrána paliva TAP 2 a KAL 2 a dále směsi MIX 2 – 4. Hodnoty nedopalu mezi 20 a 30 hm. % lze označit ještě za uspokojivé. Tyto hodnoty se týkají paliv TAP 2, KAL 2 a MIX 2 a jsou způsobeny rychlým průletem prachových částic, které z důvodu velmi krátké zdržné doby v rotační peci nestihnou zcela vyhořet. Naproti tomu výrazná hodnota nedopálených částic v případě palivových směsí MIX 3 a 4 kolem 60 hm. % naznačuje zhoršené spalovací podmínky v peci a její podchlazení. Důvodem byla nutnost ponechat přídavný hořák na zemní plyn po dobu zkoušek s MIX 3 a 4 vypnutý. Na základě analýzy nedopalu v popelu a popílku lze spalovací podmínky během všech zkoušek označit za uspokojivé. S výjimkou hnědého uhlí palivo vždy vyhořelo. Zvýšená míra nedopalu v popílku při spalování směsi MIX 3 a 4 naznačuje sníženou kvalitu spalování, což je dále potvrzeno zvýšenou tvorbou emisí CO (viz kapitola 6.5).

### Provozní problémy

V této kapitole jsou představeny hlavní provozní problémy, které souvisely zejména s podáváním paliva pomocí šnekového dopravníku, anebo tvorbou nápeků a aglomerátů z popelu.

Jedním z hlavních provozních problémů nastal při dávkování lesního odpadu pomocí šnekového dopravníku. Větší kusy dřevní hmoty se zasekávaly v podávací trubce, což vedlo k ohnutí šneku v násypce (viz Obr. 7). Zkouška byla přerušena, šnek narovnan a vyztužen vložením a navařením trubky do jeho části.



Obr. 7 Ohnutí šneku v podávací trubce při dávkování lesního odpadu

Při dávkování paliva TAP 1 byla pozorována tendence ke zhutnění a tavení paliva v podávací trubce. Palivo vycházelo z trubky ve zhutněném a plastickém stavu. Během zkoušek došlo i k úplnému ucpání podávací trubky a zkroucení nezpevněné části konce. Další zkoušky tedy byly přerušeny a byl objednan nový šnek s upravenou geometrií. Nový šnek s upravenou geometrií, délkou a v robustním nerezovém provedení (viz Obr. 8) již nevykazoval žádné provozní problémy.



Obr. 8 Nový šnek s upravenou geometrií a délkou

Dále, při spalovací zkoušce s KAL 1 došlo k překročení maximálního doporučeného výkonu rotační pece. V tomto provozním režimu při teplotách okolo 1100 °C docházelo k výraznému tavení popelu. Pec byla stále provozována v tzv. sypném režimu, v popelu se však nacházely nataveniny/tzv. aglomeráty (viz Obr. 9). Kolem teploty 1200 °C již byla tendence k natavování popelů výrazná. Pec byla provozována na pomezí sypného a tavného režimu a došlo ke vzniku nápeku ve tvaru prstence ve vzdálenosti asi 1,5 metru od čela pece. Po skončení etapy spalovacích zkoušek byl po zchladnutí pece tento prstenec mechanicky odstraněn, aby nedošlo k ovlivnění dalších experimentů.



Obr. 9 Aglomeráty (až 12 cm dlouhé) v popelu při spalování KAL 1

Při spalovacích zkouškách s MIX 1 byla při vyšších teplotách přes 1000 °C pozorována tendence k natavování popelu, což je pravděpodobně důsledkem přítomnosti plastového odpadu v TAP a také nízkou teplotou tavení popelu z čistírenského kalu. Z tohoto důvodu byla teplota udržována do 960 °C.

Palivo TAP 2 má nízkou objemovou hmotnost (nebylo peletizováno), v důsledku čehož docházelo k výraznému klenbování paliva v násypce (tj. zásobníku paliva) a tím

k nerovnoměrnému dávkování paliva do rotační pece – bylo potlačeno častým manuálním borcením klenb. Obsah plastu v palivu se hned u čela pece silně nalepoval na její stěny. Ve vstupní části pece vznikaly drobné hrudky popelu, které následně vyhořely a nezpůsobovaly výraznější provozní komplikace.

Z důvodu určitého obsahu plastů v TAP 2 a zároveň obsahu snadno tavitelného popelu v KAL 2 došlo při spalování směsi MIX 3 a 4 u čela pece k tvorbě nežádoucích nápeků na stěny pece viz Obr. 10. Tyto palivové směsi mají velkou výhřevnost z důvodu vysokého zastoupení paliva TAP 2. Z tohoto důvodu dochází k rychlému hoření směsi hned na začátku pece a k výraznému nárůstu provozních teplot. Aby bylo zamezeno napékání popelu na stěny pece, muselo dojít ke snížení provozních teplot vypnutím přídavného hořáku na zemní plyn. Poté již palivo nemělo tendence k napékání na stěny pece. Nežádoucím důsledkem snížení spalovacích teplot však bylo nedostatečné dohoření paliva v peci, což je patrné zejména na zvýšené produkci popílku s vysokým obsahem nespálených částic a vysoké tvorbě CO.



Obr. 10 Nápeky ve vstupní části pece po spalovací zkoušce s MIX 2 – 4

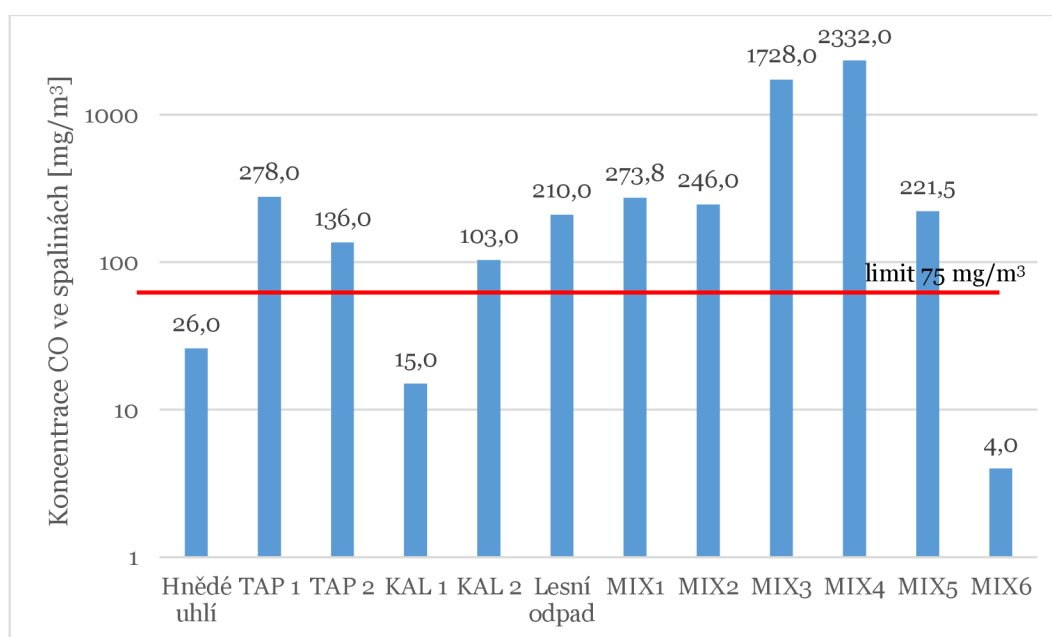
Provozní problémy se týkaly zejména dávkování paliva anebo natavování popelu na stěny rotační pece. Tyto problémy nebránily úspěšnému pokračování spalovacích zkoušek a neměly zásadní vliv na data naměřená během emisních měření. Těmto měřením a výběru vhodné palivové směsi se věnuje zbývající část práce.

### 6.5 Vyhodnocení emisní tvorby – O<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, TOC, HCl, HF a NH<sub>3</sub>

Během spalovacích zkoušek byly měřeny a zaznamenávány plynné emise O<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, TOC, HCl, HF, NH<sub>3</sub> a Hg. Tyto emise byly měřeny v bodě Mo anebo v bodě M1 (viz Obr. 2). V průmyslové praxi jsou zařízení pro spalování odpadu a tuhých paliv vybavena systémy pro čištění spalin, čímž je zajištěno splnění legislativního požadavku na produkci nežádoucích emisí. **Smyslem vyhodnocení plynných emisí tedy není porovnání**

**s emisním limitem**, ale možnost srovnání jednotlivých paliv a palivových směsí mezi sebou. Naměřené hodnoty emisí mohou být podkladem pro případnou formulaci nároků na systémy čištění spalin při spalování konkrétních paliv. Kyslík je vyjádřen v suchých spalinách. Ostatní emise v suchém plynu, za normálových podmínek a referenční kyslík 6 %

Při spalování tuhých paliv jsou typické hodnoty koncentrace  $O_2$  ve spalinách 10 %. Tato hodnota byla během některých spalovacích zkoušek překročena. Je to důsledkem zhoršené distribuce spalovacího vzduchu. Jakmile při těchto zkouškách operátor snížil průtok spalovacího vzduchu, okamžitě došlo ke snížení kvality spalování a extrémnímu nárůstu emisí CO. Právě emise CO (viz Obr. 11) jsou spolu s koncentrací  $O_2$  ve spalinách klíčovým ukazatelem, podle kterého je řízen spalovací proces. Tyto emise byly výrazně překročeny při spalování MIX 3 a 4 z důvodu podchlazení pece – vypnutý přídavný hořák. Pro zlepšení kvality spalování lze navrhnout určitá technologická opatření, o kterých je pojednáno v následující kapitole.

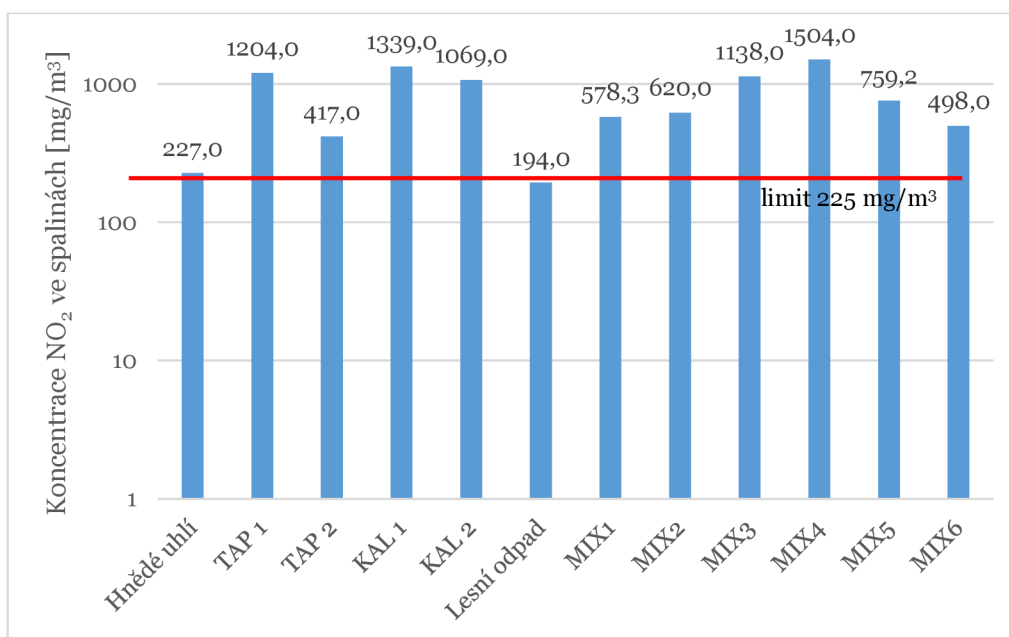


Obr. 11 Koncentrace CO ve spalinách v bodu M1 včetně srovnání s emisním limitem

Zvýšené emise  $NO_2$  (limit 225  $mg/m^3$ ) jsou indikátorem zvýšených spalovacích teplot anebo zvýšeného obsahu dusíku v palivu. Snížení negativních dopadů  $NO_2$  probíhá eliminací jejich produkce úpravou spalovacích podmínek anebo čištěním spalin pomocí katalytické/nekatalytické redukce těchto látek.

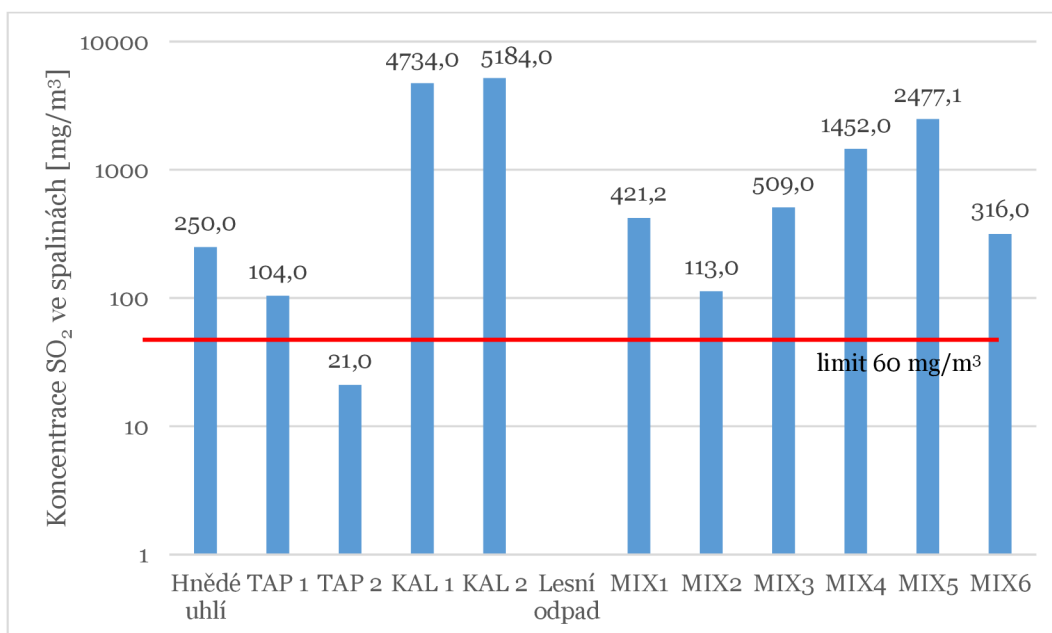
Emisní limit pro  $NO_2$  byl s výjimkou spalování lesního odpadu vždy překročen (viz Obr. 12). U lesního odpadu došlo díky vysoké vstupní vlhkosti paliva k rozložení teplot po délce pece a ke snížení spalovacích teplot. Lze předpokládat, že za relativně vysokou tvorbu  $NO_2$  u ostatních paliv stojí nejen tzv. termické  $NO_2$ , které vznikají při teplotách nad 1050 °C, ale rovněž tzv. palivové  $NO_2$ , jejichž původ je přímo v tuhém palivu. Tab. 1 uvádí obsah dusíku v jednotlivých palivech. Vyšší obsah dusíku mají KAL 1 a KAL 2. Právě paliva TAP 1 a KAL 1 a 2 vykazovala vysokou míru tvorby  $NO_x$ . Zjevný je rovněž trend vzrůstající tvorby  $NO_x$  při rostoucím zastoupení paliva KAL 2 v palivové směsi (viz směsi MIX 2 – 4). Vysoká hodnota tvorby  $NO_x$  při spalování KAL 1 není vzhledem k vysokým provozním teplotám překvapivá. Zajímavá je však vysoká míra produkce těchto látek při spalování směsí MIX 3

a 4, kdy byly z důvodu nutnosti vypnutého hořáku na zemní plyn provozní teploty relativně nízké.



Obr. 12 Koncentrace NO<sub>2</sub> ve spalinách v bodu M1 včetně srovnání s emisním limitem

Emise SO<sub>2</sub> (limit 60 mg/m<sup>3</sup>) mají původ v obsahu síry v palivu. Jejich koncentrace je běžně redukována (mokrou, polosuchou nebo suchou metodou) v systémech čištění spalin. Zvýšené hodnoty emisí této látky jsou charakteristické pro čistírenské kaly, což bylo při spalovacích zkouškách potvrzeno (viz Obr. 13) nejen u samostatných paliv KAL 1 a KAL 2, ale také u jejich směsí (souvisí s obsahem prchavé síry v palivu viz Tab. 1).



Obr. 13 Koncentrace SO<sub>2</sub> ve spalinách v bodu M1 včetně srovnání s emisním limitem

Emise HCl, HF, NH<sub>3</sub> byly při všech spalovacích zkouškách měřeny v měřicím bodě M1 (viz Obr. 2). Emise HCl jsou zodpovědné za zvýšenou korozi spalovacích zařízení a zařízení pro výměnu tepla. Obsah chloru v palivu je při spalování alternativních paliv přísně

sledovaný. Během všech spalovacích zkoušek byl emisní limit ( $12 \text{ mg/m}^3$ ) pro HCl dodržen. Emise HF vznikají zejména při spalování průmyslových odpadů, čistírenských kalů a biomasy s obsahem fluoru. Tyto látky lze účinně vyčistit například metodou mokré vypírky v tzv. Venturiho pračce. Emisní limit pro HF (o hodnotě  $1,5 \text{ mg/m}^3$ ) byl překročen při spalování hnědého uhlí, KAL 2, lesního odpadu a MIX 6. Nenulová koncentrace  $\text{NH}_3$  byla naměřena pouze při spalování KAL 1 na hodnotě  $18,7 \text{ mg/m}^3$ . V ostatních případech byly naměřeny emise  $\text{NH}_3$  nulové nebo pod mezí detekce. V palivu KAL 1 se zřejmě nacházel amoniak.

Jako perspektivní palivová směs se prozatím jeví MIX 6, která vykázala nejnižší tvorbu  $\text{NO}_2$  a druhou nejnižší tvorbu  $\text{SO}_2$ . Směs dále splnila emisní limit pro HCl i bez čištění spalin. Lehce nadlimitní tvorbu HF je nutné upravit úpravou provozních podmínek nebo nastavením systému čištění spalin. Emise amoniaku byly naměřeny stejně jako u ostatních směsí na nulové hodnotě. Z pohledu dosavadních poznatků jsou zajímavé také směsi MIX 1, MIX 2 a MIX 5, jejichž spalování v rotační peci bylo bezproblémové. Mírně zvýšená tvorba  $\text{NO}_2$ , případně  $\text{SO}_2$  naměřená u těchto směsí je řešitelná pomocí systému čištění spalin. Emise HCl splnily limit i bez čištění spalin, hodnota produkce HF byla pod hranicí měřitelnosti.

## 6.6 Vyhodnocení tvorby TZL

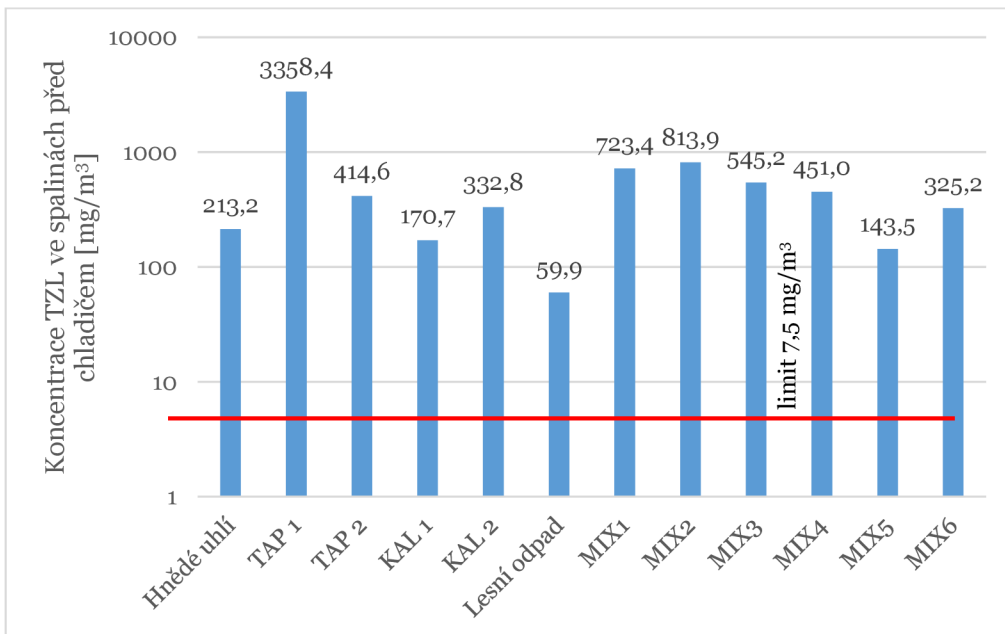
Vyhodnocení tvorby TZL je klíčové pro posouzení rizika zanášení teplosměnných ploch. To má vliv na celkovou účinnost přenosu tepla, a tedy na celkovou ekonomiku spalovacího procesu. Jakmile bude docházet k minimální tvorbě částic TZL, míra rizika zanášení teplosměnných ploch bude také minimální (zaleží však i na dalších provozních podmínkách jako je teplota spalin, míra nedopalu v TZL atp.). Emisní limit pro TZL ve spalinách je  $7,5 \text{ mg/m}^3$ .

Emise TZL naměřené v bodě Mo nelze považovat za relevantní a není s nimi dále počítáno (prostorové možnosti Zkušebny neumožnily dodržet 5 průměrů potrubí před bodem a 3 za). Z tohoto důvodu jsou v této práci dále analyzovány pouze měřicí body M1 a M2. Jedná se o místa před (viz Obr. 14) a za chladičem, kde bylo dosaženo homogenního proudění spalin a kde nastaly vhodné podmínky pro měření. Měření v těchto dvou bodech umožňuje sestavit rychlost usazování částic v trubkovém chladiči (viz Obr. 15).

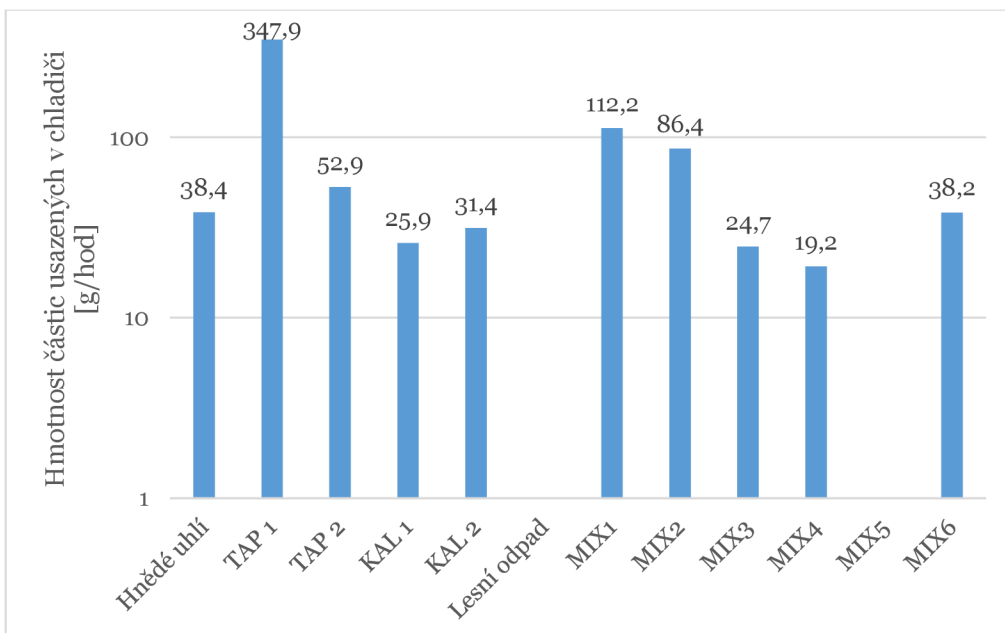
Spalování biomasy, kterou obsahovalo palivo TAP 1 ze 20 hm. %, může vykazovat vyšší tvorbu TZL [12]. V případě spalování TAP 1 byly pozorovány výrazně nejvyšší hodnoty tvorby TZL. Tento trend byl patrný již při odběru filtru z měřicí aparatury. Hodnoty před trubkovým chladičem byly téměř  $3\,400 \text{ mg/m}^3$  TZL, což je téměř patnáctinásobek hodnoty při spalování hnědého uhlí či čistírenského kalu a dokonce šedesátinásobek hodnoty odpovídající spalování lesního odpadu. Při spalování TAP 1 přirozeně vychází i nejvyšší usazovací rychlost částic v chladiči. Při spalování tohoto typu odpadu lze předpokládat zvýšené zanášení teplosměnných ploch.

V případě lesního odpadu se v případě výchozích paliv nepodařilo relevantní hodnotu rychlosti usazování zaznamenat. Vzhledem k minimální tvorbě částic TZL (mezi  $60$  a  $80 \text{ mg/m}^3$ ) lze však předpokládat i minimální míru zanášení chladiče při spalování tohoto typu paliva. Při spalování směsi MIX 5 byla koncentrace TZL měřena pouze v bodě M1. Z tohoto důvodu nebylo možné vypočítat hmotnost částic usazených v chladiči. Překvapivá je zvýšená tvorba částic TZL při spalování směsí MIX 2 – 4, která se skládá z paliv TAP 2

a KAL 2. Právě tyto dvě složky vykazovaly při spalovací zkoušce samostatného paliva nižší (přibližně poloviční) tvorbu TZL. Předpoklad, že tvorba TZL bude úměrná míře zastoupení jednotlivých paliv ve směsi zde nebyl potvrzen. Tento dílčí výsledek může mít několik příčin (zejména různé provozní podmínky), o kterých dále pojednává kapitola 6.8. Sloupcový graf popisující hmotnost částic usazených v chladiči (Obr. 15) relativně věrně kopíruje graf koncentrace TZL v bodě M1 (Obr. 14).



Obr. 14 Koncentrace TZL ve spalinách v bodu M1 před chladičem



Obr. 15 Hmotnost částic usazených v chladiči

Částice TZL jsou v průmyslové praxi odloučeny pomocí elektrostatických odlučovačů, anebo zachyceny na částicových filtrech. Z hlediska dodržení emisních limitů jejich tvorba není problematická. Z hlediska potenciálního zanášení teplosměnných ploch se však jedná o klíčový ukazatel. Prozatím byla jako potenciálně vhodná označena směs MIX 6, případně

směsi MIX 1, 2 a 5. Na základě vyhodnocení míry tvorby TZL lze prozatím potvrdit vhodnost směsi MIX 6, která vykazala druhou nejnižší hodnotu. Také směs MIX 5 se prozatím jeví jako velmi vhodná alternativa fosilních paliv, která vykazala nejnižší tvorbu částic TZL. Naproti tomu směsi MIX 1 a 2 zaznamenaly zvýšenou tvorbu TZL. U těchto směsí tedy lze předpokládat zvýšené riziko zanášení. Při správné volbě spalovací technologie a systému čištění spalin se však stále jedná o zajímavé alternativní palivové směsi.

### 6.7 Posouzení zanášení teplosměnných ploch

Během experimentů proběhlo vyhodnocení zanášení teplosměnných ploch v rámci 10hodinové spalovací zkoušky s palivovou směsí MIX 6. Tato analýza není zdrojem dat pro volbu vhodné palivové směsi, ale spíše zdrojem inspirace pro provozní doporučení.

Po 10hodinové spalovací zkoušce se směsí MIX 6 byl chladič rozebrán viz Obr. 16. Na zobrazeném výměníku probíhalo proudění spalin ve směru zprava doleva. Při bližším pohledu je zjevné, že míra zanášení je úměrná rychlosti proudění spalin. Jakmile dojde vlivem tlakové ztráty ke snížení rychlosti proudění, míra zanášení je větší (segment vlevo je výrazně více zanesený než segment vpravo).



Obr. 16 Stav segmentů chladiče spalin po spalovacích zkouškách (směr proudění spalin byl zprava doleva)

Na trubce, která se jako první dostala do kontaktu se spalinami je zjevný předěl v typu nánosu. Na straně ofukované horkými spalinami došlo k tvorbě spečeného – nataveného nánosu, zatímco na druhé straně byl práškový nános. U dalších trubek, které jsou v částečném zákrytu za předešlými trubkami je větší plocha s práškovým nánosem. Platí, že čím je rychlost nižší, tím je vyšší tendence k zanášení teplosměnných ploch. Na Obr. 16 je dobře viditelné, že segment vlevo je více zanesený než segment vpravo. V místech, kde bylo množství procházejících spalin nejvyšší, je pozorovatelné zvýšené zanášení koncových oblouků chladičích trubek viz Obr. 17.





Obr. 17 Stav posledního segmentu chladiče spalin po spalovacích zkouškách (směr proudění spalin byl zprava doleva)

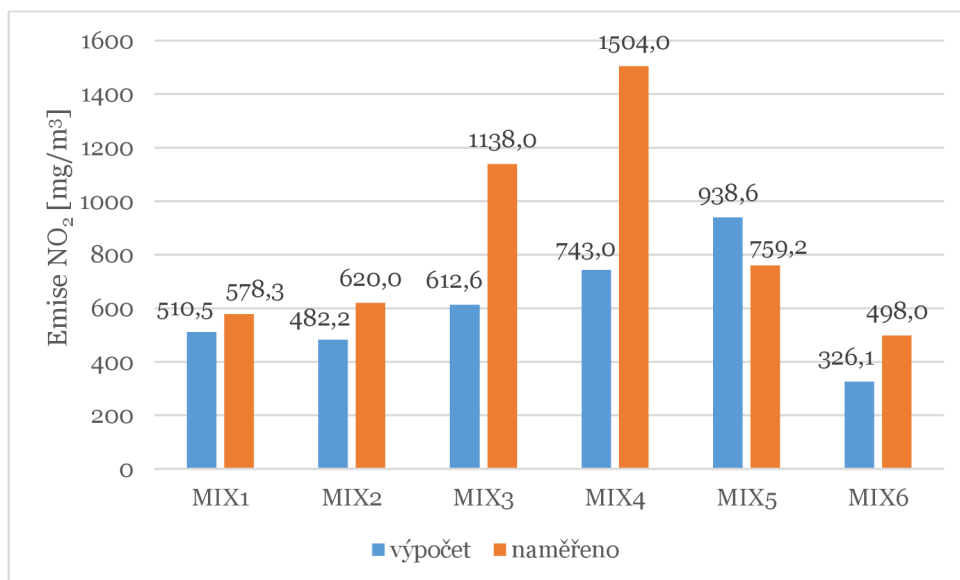
Na základě provedených pozorování lze jako kritická místa označit ta, kde se vyskytuje mimořádně velký objemový tok spalin v důsledku minimální tlakové ztráty. Dále pak ta, kde mají spaliny minimální rychlost. Jedná se o poslední část chladiče spalin, trubky nacházející se v zákrytu za ostatními trubkami a také oblouky trubek vystavené proudění množství spalin. Lze konstatovat, že vzhledem k relativně krátké spalovací zkoušce (10 hodin) je míra zanesení teplosměnných ploch vysoká.

Z hlediska zanášení teplosměnných ploch a stanovení účinnosti přenosu tepla je klíčové vyhodnocení energetické bilance chladiče spalin. Vyhodnocení účinnosti výměny tepla na začátku a konci 10hodinové spalovací zkoušky s MIX 6 přineslo zajímavé výsledky. Tato účinnost byla vypočítána jako podíl tepla přijatého chladičí vodou a tepla odevzdaného horkými spalinami. Bylo zjištěno, že zatímco účinnost výměny tepla byla na začátku 10hodinové spalovací zkoušky rovna 92 %, na konci této zkoušky byla rovna 86 %. **Již po několika hodinách provozu došlo vlivem nánosů na teplosměnných plochách k nezanedbatelnému poklesu účinnosti přenosu tepla.**

### 6.8 Srovnání odhadovaných a reálně naměřených emisí

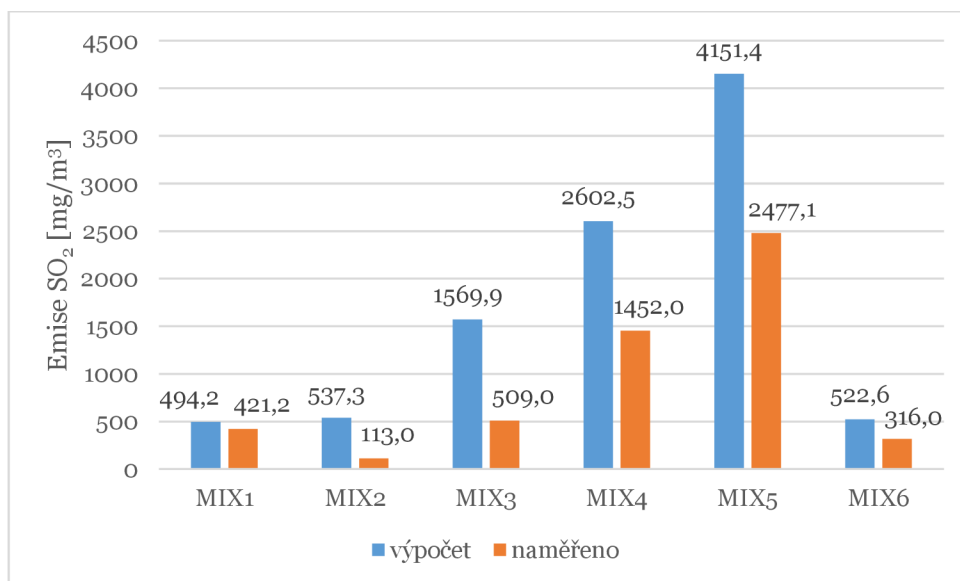
V této kapitole jsou srovnány odhadované a reálně naměřené emise TZL, SO<sub>2</sub> a NO<sub>2</sub>. Odhad tvorby emisí u palivových směsí vychází z výsledků spalovacích zkoušek s dílčími palivovými složkami na základě pákového pravidla. Pokud by například při spalování čistírenského kalu byla naměřená tvorba 100 mg/m<sup>3</sup> SO<sub>2</sub>, zatímco při spalování lesního odpadu by byla naměřena jeho nulová koncentrace, pak by byla v jejich směsi 1:1 odhadována tvorba 50 mg/m<sup>3</sup> SO<sub>2</sub>. Z následujících tabulek je zřejmé, že tento odhad (první sloupec) se ne vždy shodoval s reálně naměřenými hodnotami (druhý sloupec). Rozdíl těchto dvou hodnot je uveden vždy ve třetím sloupci, zatímco čtvrtý sloupec vyjadřuje v %, o kolik se reálně naměřená hodnota liší od té odhadované.

Analýza tvorby NO<sub>2</sub> (viz Obr. 18) ukazuje, že odhadované koncentrace byly nižší (podhodnocené) než reálně naměřené. Tuto analýzu je však nutné interpretovat s ohledem na mechanismy, při kterých tyto škodlivé emise vznikají. Míra tvorby NO<sub>2</sub> je velmi závislá na provozních podmínkách v peci. Provozní podmínky nebyly během spalovacích zkoušek vždy stejné. Tyto podmínky byly nastavovány s ohledem na dosažení maximální míry dohoření paliva/vyhnutí se tvorby nápeků na stěny pece, nikoliv dodržení konstantních spalovacích podmínek.



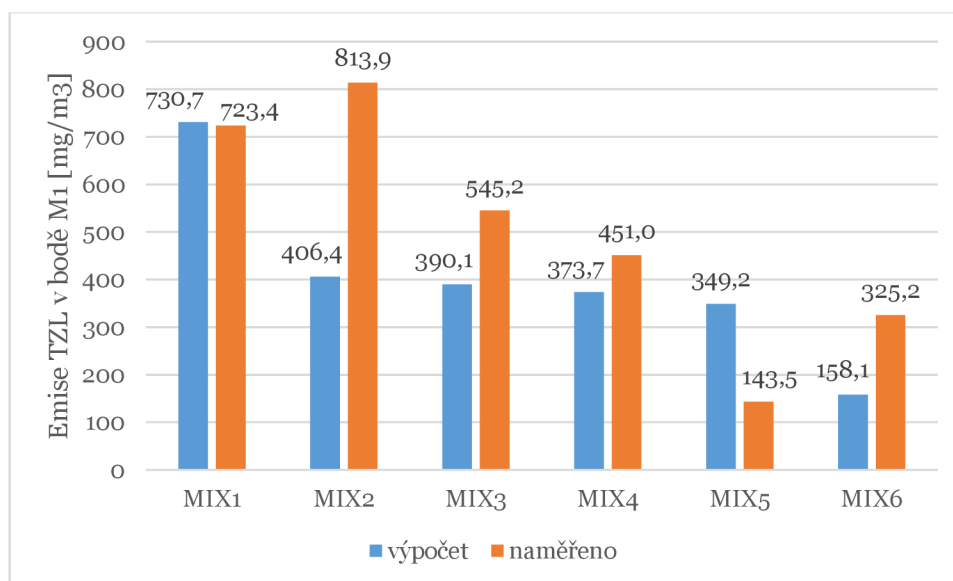
Obr. 18 Porovnání hodnot NO<sub>2</sub> naměřených a odhadovaných na základě výpočtu

Z analýzy odhadované a reálně naměřené koncentrace SO<sub>2</sub> (Obr. 19) je zřejmé, že reálné emise byly naopak nižší, než jakých bylo dosaženo při spalování samostatných paliv. Nejvíce je to patrné u směsi MIX 2, kde reálná tvorba SO<sub>2</sub> dosahovala pouze 21 % tvorby odhadované. Naproti tomu nejvíce shodné byly výsledky při spalování směsi MIX 1. Lze konstatovat, že spalování palivových směsí mělo pozitivní vliv na emisní tvorbu SO<sub>2</sub>.



Obr. 19 Porovnání hodnot SO<sub>2</sub> naměřených a odhadovaných na základě výpočtu

Výsledky analýzy tvorby částic TZL v měřicím bodě M1 (před chladičem spalin) jsou na Obr. 20. Největší shody odhadovaných a reálně naměřených hodnot bylo dosaženo při spalování směsi MIX 1 v měřicím bodě M1.



Obr. 20 Porovnání hodnot TZL naměřených a odhadovaných na základě výpočtu v měřicím bodě M1

**Nulová výzkumná hypotézu ve znění: „Složení tuhého paliva nemá vliv na tvorbu znečišťujících látek při jeho spalování v rotační peci.“, může být na základě dosažených výsledků vyvrácena.** Přestože se odhad produkce emisí u palivových směsí ve většině případů výrazně lišil od reálně naměřených hodnot, lze konstatovat, že složení paliva má jednoznačný vliv na tvorbu znečišťujících látek. To je patrné například u produkce emisí SO<sub>2</sub>. Jakmile byl v palivové směsi ve větší míře zastoupen čistírenský kal se zvýšeným obsahem prchavé síry, jednoznačně docházelo k nárůstu produkce SO<sub>2</sub>.

**Naproti tomu první výzkumnou hypotézu ve znění: „Na základě složení tuhého paliva lze předpovědět tvorbu znečišťujících látek.,, nelze na základě dosažených výsledků potvrdit.** Je zřejmé, že odhadované emise uvedené v této kapitole se liší od reálně naměřených hodnot. Přesto však nelze první hypotézu zcela vyvrátit. Na základě výsledků této práce lze konstatovat, že odhad produkce znečišťujících látek je možný. Klíčové je nalezení a popsání chemismů, ke kterým dochází při spalovacích procesech. Pokud v budoucnu budou tyto chemismy důkladněji popsány, bude na jejich základě možné složením paliva a úpravou provozních podmínek ovlivnit emisní tvorbu.

**Druhou výzkumnou hypotézu ve znění: „Složení směsi tuhého paliva lze zvolit tak, aby došlo ke snížení tvorby znečišťujících látek.“ lze potvrdit.** Příkladem je právě doporučená palivová směs MIX 6, jejíž produkované emise SO<sub>2</sub> byly nižší, než jak bylo odhadováno na základě spalovacích zkoušek jejich dílčích složek.

## 7 Komplexní vyhodnocení a doporučení do praxe

Experimentální část práce zahrnovala spalovací zkoušky 6 paliv a 6 palivových směsí. Tyto zkoušky jsou extrémně nákladné – jeden den vychází na asi 100 000,- Kč. Z tohoto důvodu

byla provedena vždy jedna zkouška pro samostatné palivo a jedna zkouška pro palivovou směs. Vypovídající schopnost provedených zkoušek je omezena a je doporučeno v budoucnu zkoušky opakovat. Přesto spalovací zkoušky přinesly řadu cenných poznatků.

Jako **nejvíce perspektivní palivová směs byla vyhodnocena směs MIX 6**. Ta vykázala nejnižší tvorbu NO<sub>2</sub>, druhou nejnižší tvorbu SO<sub>2</sub> a splnila emisní limit pro HCl i bez čištění spalin. Z hlediska tvorby TZL směs MIX 6 vykázala druhou nejnižší hodnotu produkce. Spalování této směsi nevykazovalo žádné provozní problémy, směs má díky vysokému zastoupení vlhkého lesního odpadu nízkou prašnost a všechny její složky lze označit na českém trhu za dostupné. Zastoupení jednotlivých složek kopíruje předpokládanou dostupnost dílčích paliv na českém trhu. Z těchto důvodů se MIX 6 jeví jako palivová směs s největším potenciálem pro uplatnění v průmyslové praxi.

Dále lze s jistými výhradami doporučit také směsi MIX 1, MIX 2 a MIX 5. Jejich spalování v rotační peci bylo bezproblémové a mírně zvýšené emise NO<sub>2</sub>, případně SO<sub>2</sub> naměřené u těchto směsí jsou řešitelné pomocí systému čištění spalin. U směsí MIX 1 a 2 je nutné brát v úvahu zvýšenou hodnotu částic TZL, zatímco u směsi MIX 5 (nejnižší tvorba TZL) byly z důvodu vysokého zastoupení čistírenského kalu naměřeny vysoké hodnoty SO<sub>2</sub>. Při správné volbě spalovací technologie a systému čištění spalin se také jedná o perspektivní alternativní palivové směsi.

Naproti tomu směsi MIX 3 a 4 se pro spalování v rotační peci neosvědčily. Vlivem svého složení měly obě tyto směsi velký sklon k natavování popelu na stěny rotační pece. Charakter směsí neumožňoval nalézt vhodné spalovací podmínky. Při volbě jiné spalovací technologie a správné integraci systému čištění spalin se však jedná o zajímavé alternativní palivové směsi. **O vhodné volbě směsi bude v praxi rozhodovat také její dostupnost a cena.** Ekonomické hodnocení nebylo předmětem této práce, ale pro další výzkum se jedná o velmi žádoucí směr.

Univerzální konstrukce poloprovodní rotační pece umožňuje její použití pro široké spektrum experimentů jako je kalcinace, sušení, sintrování či jakýkoliv jiný proces úpravy sypké látky za zvýšených teplot. Pro dosažení lepších spalovacích podmínek (spalovací zkoušky proběhly za vysokých přebytků vzduchu) blízcích se reálným průmyslovým podmínkám by bylo vhodné vyzdívku experimentální pece doplnit o lopatky či jiné segmenty zlepšující míchání tuhého paliva se spalovacím vzduchem. Přesto jsou získané poznatky cenné a přispívají naplňování záměru zvýšit zastoupení alternativních paliv v energetickém a zpracovatelském průmyslu.

### **Doporučení týkající se dávkování paliva:**

- a) Během všech spalovacích zkoušek provedených s novým šnekem (**delším než trubka o 50 mm** a v robustním nerezovém provedení) nebyl zaznamenán žádný problém s dávkováním paliva. Bylo prokázáno, že nový šnek je pro dávkování paliva do rotační pece vhodný.
- b) Za účelem eliminace klenbování v násypce podávacího zařízení je doporučeno alternativní palivo peletizovat či jinak zhutnit a homogenizovat. Pokud to charakter paliva neumožňuje, je zapotřebí zajistit míchání paliva v násypce za účelem borcení klenb.
- c) Při dávkování dřevní štěpky je doporučeno její drcení za účelem snížení rizika zkroucení či jiného poškození podávacího šneku.

## Doporučení pro zvýšení kvality spalování:

- a) Na základě zjištěných poznatků je doporučeno se **při spalování čistírenského kalu v rotační peci pohybovat na teplotách do 950 °C**. Již při teplotách vyšších o 100 °C docházelo k výrazné tvorbě aglomerátů. Při teplotách okolo 1200 °C byl popel z čistírenského kalu již v tekutém stavu a natavil se na stěny pece, odkud musel být mechanicky odstraněn.
- b) Spalování palivových směsí MIX 3 – 4 bylo problematické. Palivo se z důvodu obsahu vysoce výhřevných plastů v TAP navyšujících teploty u čela pece natavovalo na stěny pece. Z tohoto důvodu byl po dobu zkoušek vypnutý přídavný hořák na zemní plyn, čímž došlo ke snížení spalovacích teplot a omezení nežádoucího natavování. Na základě těchto zkušeností bylo předpokládáno, že směs MIX 5 (80 hm. % KAL 2 a 20 hm. % TAP 2) bude také problematická. Tento předpoklad se však v průběhu spalovacích zkoušek s MIX 5 nepotvrdil. Tendence k napékání toto palivo nevykazovalo, přestože byl přídavný hořák na zemní plyn po dobu zkoušek zapnutý. To je pravděpodobně způsobeno nižší výhřevností paliva, v důsledku čehož nedocházelo k intenzivnímu spalování paliva u čela pece. Palivo hořelo po větší délce pece. Vyšší obsah čistírenského kalu vedl k bezproblémovému provozu rotační pece. Na základě tohoto poznatku lze konstatovat, že vhodné poměrové zastoupení dílčích složek palivové směsi může s výhodou minimalizovat nežádoucí projevy těchto složek. Je však zapotřebí brát v úvahu nejen provozní vlastnosti paliv, ale také jejich složení, které má zásadní vliv na produkci škodlivých emisí. Je samozřejmé, že spalování směsí bohatých na čistírenské kaly klade vyšší nároky na systém čištění spalin.
- c) V rámci výpočtu tepelného výkonu pece bylo zjištěno, že doporučený rozsah minimálního a maximálního výkonu pece **100 – 200 kW/m<sup>3</sup> je dobrým vodítkem** pro nastavení vhodných provozních podmínek. Jedná se o důležité provozní doporučení! Jakmile došlo k podchlazení pece nedodržením minimálního doporučeného výkonu pece (směsi MIX 3 a 4), byl zjištěn výrazný nedopad v popílku a extrémní tvorba emisí CO. To jednoznačně dokládá nedokonalé spalování a podchlazení pece.

## 8 Závěr

Rešerše současného stavu poznání ukázala aktuálnost tématu spalování alternativních paliv z pohledu energetické i environmentální udržitelnosti. Pro budoucí využití RP jsou nejdůležitější následující výzkumná témata:

1. Nalezení vhodných směsí alternativních paliv s cílem maximalizovat procentuální zastoupení těchto paliv při spoluspalování s konvenčními palivy. Přitom je třeba minimalizovat negativní vlivy alternativních paliv jako jsou zvýšená tvorba TZL, tvorba nápeků na stěnách spalovacích zařízení, či snížená kvalita slínku v cementárenském průmyslu.
2. Zlepšení ekonomiky provozu rotačních pecí při pyrolýzních procesech.
3. Zvýšení účinnosti rotačních pecí a snížení tvorby škodlivých emisí pomocí umělé inteligence.

Práce k řešení těchto témat přispívá konkrétním výběrem paliv a jejich přímým experimentálním ověřením s ohledem na produkci škodlivých emisí včetně TZL a analýzy

produkce těžkých kovů. Jako **nejvhodnější alternativa fosilních paliv se jeví palivová směs MIX 6 skládající se ze 70 hm. % lesního odpadu, z 20 hm. % TAP 2 a z 10 hm. % KAL 2**. Díky tomu, že výsledky byly získány na poloprovozním experimentálním zařízení, bylo možné zformulovat konkrétní provozní doporučení pro průmysl. Tato doporučení pomohou nalézt a využívat vhodné směsi tuhých paliv spalovaných v cementárnách či vápenkách, spalovnách průmyslového odpadu, případně i v elektrárnách a teplárnách s kotli na tuhá paliva. Minimalizace tvorby úsad vhodnou volbou palivové směsi vede k maximalizaci přestupu tepla a tím i účinnosti celého zařízení. Tato opatření vedou ke snížení provozních nákladů bez nutnosti větších investic.

Nulová hypotéza této práce zněla: „Složení tuhého paliva nemá vliv na tvorbu znečišťujících látek při jeho spalování v rotační peci.“ a na základě výsledků byla jednoznačně vyvrácena. Složení paliva anebo palivové směsi má vliv na tvorbu znečišťujících látek.

Hlavními výzkumnými hypotézami, na které hledala odpověď předložená dizertační práce, byly:

1. Na základě složení tuhého paliva lze předpovědět tvorbu znečišťujících látek.
2. Složení směsi tuhého paliva lze zvolit tak, aby došlo ke snížení tvorby znečišťujících látek.

První výzkumná hypotéza nebyla potvrzena, zatímco druhá hypotéza potvrzena byla. Potvrzení druhé hypotézy prokázalo, že provedený výzkum má potenciál a je doporučeno v něm dále pokračovat. Současný stav poznání prozatím neumožňuje popis všech chemických reakcí, ke kterým dochází během spalovacího procesu. Obě výzkumné hypotézy je proto doporučeno ověřit během dalších výzkumných aktivit a navázat tak na současná poznání vycházející z této dizertační práce. Na základě zjištěných poznatků lze již nyní doporučit palivovou směs MIX 6 skládající se z lesního odpadu, tuhého alternativního paliva a čistírenského kalu jako vhodnou alternativu fosilních paliv. Obrovský potenciál tohoto výzkumu je zjevný. Na jeho základech lze stavět při návrhu komplexní metodiky tvorby směsí alternativních paliv za účelem jejich spalování v konvenčních i nových spalovacích zařízeních. Získaná poloprovozní data lze dále uplatnit při návrhu vhodného přístupu k otázce čištění spalin.

Výsledky této práce se již promítají do výuky na Ústavu procesního inženýrství. Vzhledem k charakteru této práce jsou poznatky využívány v předmětu Energie a emise (KEE) a jejich prezentace se nabízí i v předmětech Experimentální metody (KEM) a Procesy, energetika a legislativa (KEL).

## Použitá literatura

- [1] REHFELDT, M., WORRELL, E., EICHHAMMER, W. a FLEITER, T. A review of the emission reduction potential of fuel switch towards biomass and electricity in European basic materials industry until 2030. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2020, **120**, 109672. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2019.109672
- [2] MAKARICHI, L., JUTIDAMRONGPHAN, W., TECHATO, K. The evolution of waste-to-energy incineration: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2018, **91**, 812–821. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2018.04.088
- [3] LOMBARDI, L., CARNEVALE, E., CORTI, A. A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. *Waste Management* [online]. 2015, **37**, Special Thematic Issue: Waste-to-Energy Processes and Technologies, 26–44. ISSN 0956-053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2014.11.010
- [4] ČSN EN ISO 21637: Tuhá alternativní paliva - Terminologie, definice a popis. Česká verze evropské normy EN ISO 21637:2020, 2022.
- [5] Teplárna Přerov a palivo z odpadů. *Odpady*. Česká republika: *Economia*, 2018, XXVIII(11), str. 7. ISSN 1210-4922 MK ČR 6330.
- [6] ŠŤASTNÁ, J. Klíčový je obsah chlóru v palivu. *Odpady*. *Economia*, 2012, XXII(07-08), str.10. ISSN 1210-4922 MK ČR 6330.
- [7] Rozhodnutí o změně č. 8 integrovaného povolení společnosti Plzeňská teplárenská, a.s. pro „Centrální zdroj tepla Plzeň“. Plzeň: KRAJSKÝ ÚŘAD PLZEŇSKÉHO KRAJE ODBOR ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ, 2011.
- [8] BAŘTIPÁN, V. Vlastnosti popelů z biomasy v závislosti na procesu spalování [online]. In: [cit. 2020-08-18]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/3374127-Vlastnosti-popelu-z-biomasy-v-zavislosti-na-procesu-spalovani.html>.
- [9] BRENNER, O. a CIZNER, J. Korozní problémy při spalování biomasy a komunálního odpadu. *MMSpektrum: Komerční příloha/Povrchové úpravy* [online]. Česká republika, 7. 5. 2013, (5), strana 88 [cit. 2020-08-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/korozni-problemy-pri-spalovani-biomasy-a-komunalniho-odpadu.html>.
- [10] SAMI, M., ANNAMALAI, K. a WOOLDRIDGE, M. Co-firing of coal and biomass fuel blends. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 2001, **27**(2), 171–214. ISSN 0360-1285. Dostupné z: doi:10.1016/S0360-1285(00)00020-4
- [11] Ing. Vladimír Kopecký, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství, osobní konzultace.
- [12] FERNANDO R. Cofiring high ratios of biomass with coal. 2012.

# Curriculum Vitae

## Osobní informace

Jméno a příjmení Jiří Bojanovský  
Datum narození 29. 01. 1993  
Státní příslušnost Česká republika

## Vzdělání

Období říjen 2017 →  
Instituce Vysoké učení technické v Brně, FSI  
Studijní obor doktorský, Konstrukční a procesní inženýrství

Období září 2015 – červen 2017  
Instituce Vysoké učení technické v Brně, FSI  
Studijní obor magisterský, Procesní inženýrství

Období září 2015 – červen 2019  
Instituce Mendelova univerzita v Brně, PEF  
Studijní obor bakalářský, Manažersko-ekonomický

Období září 2012 – červen 2015  
Instituce Vysoké učení technické v Brně, FSI  
Studijní obor bakalářský, Základy strojího inženýrství

## Pracovní zkušenosti

Období září 2018 →  
Zaměstnavatel Vysoké učení technické v Brně, FSI  
Vykonávaná funkce technický a výzkumný pracovník

Období 2017  
Zaměstnavatel Nenovision, s.r.o.  
Vykonávaná funkce projektový manažer

## Znalosti a dovednosti

Mateřský jazyk čeština  
Další jazyky angličtina: pokročilý  
němčina: pokročilý začátečník  
Počítačová gramotnost Autodesk AutoCAD, Solidworks, Chemcad, Microsoft Office



## Abstrakt

Práce je zaměřená na studium vlivu složení tuhého paliva na tvorbu znečišťujících látek při spalování v rotační peci. Jedná se o vysoce aktuální téma spojené s potřebou zvyšování podílu alternativních paliv jako náhrady těch fosilních. Hlavní výzkumnou hypotézou je „Složení směsi tuhého paliva lze zvolit tak, aby došlo ke snížení tvorby znečišťujících látek.“ Pro ověření této hypotézy autor volí experimentální ověření v rámci spalovacích zkoušek na poloprovozním experimentálním zařízení. Pro spalovací zkoušky bylo navrženo rozšíření tohoto zařízení o aparáty, díky nimž je možné vyhodnocovat míru zanášení teplosměnných ploch a míru tvorby tuhých znečišťujících látek TZL. Toto zařízení bylo úspěšně použito pro spalovací zkoušky 6 vybraných alternativních paliv (tuhá alternativní paliva TAP, čistírenské kaly a lesní odpad). Na základě provedených spalovacích zkoušek s těmito dílčími palivy bylo sestaveno 6 palivových směsí s vysokým potenciálem pro průmyslové použití. I tyto směsi byly spalovány v rotační peci. Na základě dosažených výsledků byla hlavní hypotéza práce potvrzena a jako nejvhodnější alternativa fosilních paliv byla označena palivová směs, která se skládá ze 70 hm. % lesního odpadu, z 20 hm. % TAP a z 10 hm. % čistírenského kalu (v práci označena jako MIX 6). Tato směs nevykazovala žádné provozní problémy a při jejím spalování bylo dosaženo nejlepších výsledků při tvorbě plyných znečišťujících látek i TZL. Výsledky práce jsou zásadním bodem při hledání metodiky specifikace vhodných směsí alternativních paliv za účelem jejich spalování v energetickém i zpracovatelském průmyslu.

## Abstract

The work is focused on the study of the influence of solid fuel composition on the formation of pollutants during combustion in a rotary kiln. This is a highly topical issue related to the need to increase the share of alternative fuels as a substitute for fossil ones. The main research hypothesis is "The composition of the solid fuel mixture can be chosen in such a way as to reduce the generation of pollutants." To verify this hypothesis, the author chooses experimental verification in combustion tests on a semi-operational experimental device. For the combustion tests, it was proposed to extend this equipment with apparatus that allows the evaluation of the fouling rate of heat transfer surfaces and the formation rate of particulate matter pollutants. This equipment was successfully used for combustion tests of 6 selected alternative fuels (refuse-derived fuel RDF, sewage sludge, and forest waste). Based on the combustion tests conducted with these sub-fuels, 6 fuel mixtures with high potential for industrial applications were defined. These mixtures were also burned in a rotary kiln. Based on the results obtained, the main hypothesis of the work was confirmed and the fuel mixture consisting of 70 wt.% forest waste, 20 wt.% RDF and 10 wt.% sewage sludge (MIX 6 in the work) was identified as the most suitable alternative to fossil fuels. This mixture did not show any operational problems and the best results were obtained in the formation of gaseous pollutants and particulate matter. The results of this work are a crucial point in the search for a methodology for the specification of suitable alternative fuel blends for combustion in the energy and manufacturing industries.