



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

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

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Bc. Jiří Bojanovský

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Vítězslav Máša, Ph.D.

BRNO 2022

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. Autor navazuje na již provedený výzkum v dané oblasti, na základě souhrnu současného stavu poznání definuje základní charakteristiky studovaného problému a formuluje hypotézy. Hlavní 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 poloprovodním 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 plynných 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.

Klíčová slova

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

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 author builds on the research already carried out in this area, defines the basic characteristics of the problem under study and formulates hypotheses based on the summary of the current state of knowledge. The main 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.

Key words

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

BOJANOVSKÝ, Jiří. *Spalování tuhých paliv v rotační peci a vliv jejich složení na tvorbu znečišťujících látek*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/137760>. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce doc. Ing. Vítězslav Máša, Ph.D..

Prohlašuji, že jsem předloženou dizertační práci vypracoval zcela samostatně pod vedením školitele doc. Ing. Vítězslava Máši, Ph.D. na základě vlastních poznatků získaných při studiu a konzultací s odborníky. Dále prohlašuji, že jsem veškeré literární a obrazové prameny úplně citoval a uvedl v seznamu zdrojů na konci práce. V souvislosti s vytvořením této práce jsem tak neporušil autorská práva třetích osob ve smyslu Zákona c. 121/2000 Sb., o právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským, a jsem si plně vědom následků porušení těchto ustanovení.

V Brně, 29. 8. 2022

Jiří Bojanovský

Děkuji svému školiteli doc. Ing. Vítězslavu Mášovi, Ph.D. za čas, ochotu, cenné připomínky a trpělivost při vedení této práce. Dále děkuji Ing. Pavlu Skryjovi, Ph.D., Ing. Igoru Hudákovi, Ph.D., Ing. Davidu Jechovi, Ph.D., Ing. Vladimíru Brummerovi, Ph.D. a Ing. Vladimíru Kopeckému za spolupráci a cenné rady, na jejichž základech je postavena tato práce.

Obsah

1	Úvod a motivace práce	1
2	Cíle práce a použité metody	3
3	Současný stav poznání	7
3.1	Umělá inteligence v řízení rotačních pecí.....	8
3.2	Spalování alternativních paliv při výrobě cementu a vápna	9
3.3	Zpracování odpadu pyrolýzou v rotační peci.....	10
3.4	Aplikace rotačních pecí při využití a akumulaci solární energie.....	12
3.5	Využití rotačních pecí pro zpracování čistírenského kalu.....	13
3.6	Využití rotačních pecí pro likvidaci odpadních pneumatik.....	14
3.7	Charakteristika tuhých alternativních paliv a související legislativa v České republice	15
3.8	Výsledky z provozních zkoušek spalování alternativních paliv v České republice	17
3.9	Provozní zkušenosti se spoluspalováním biomasy.....	18
3.10	Shrnutí poznatků z rešerše současného stavu poznání	19
4	Příprava a popis experimentálního zařízení	21
4.1	Výchozí stav experimentálního zařízení	21
4.2	Představení již realizovaných pilotních testů na rotační peci Ústavu procesního inženýrství	23
4.3	Úprava experimentálního zařízení pro potřeby studia tvorby TZL	24
5	Formulace metodiky měření a příprava experimentu.....	29
5.1	Postup výzkumných činností	29
5.2	Metodika experimentu	30
5.3	Alternativa k experimentálnímu přístupu.....	36
6	Výsledky.....	38
6.1	Spalovaná paliva – dílčí složky palivových mixů.....	38
6.1.1	Hnědé uhlí	38
6.1.2	TAP 1 – tříděný plastový komunální odpad s biosložkou.....	39
6.1.3	TAP 2 – certifikované palivo ASAPAL	40
6.1.4	KAL 1 – zimní	42
6.1.5	KAL 2 – letní	43
6.1.6	Lesní odpad	44
6.2	Návrh směsí paliv.....	45
6.3	Materiálová bilance.....	49

6.4	Výpočet tepelného zatížení rotační pece.....	55
6.5	Provozní parametry, vyhodnocení provozních poznatků a kvality spalování	57
6.5.1	Teploty v rotační peci jako klíčový provozní ukazatel	58
6.5.2	Kvalita spalování – vyhodnocení míry nedopalu v popelu a popílku	71
6.5.3	Provozní problémy	72
6.6	Vyhodnocení emisní tvorby – O ₂ , CO, NO ₂ , SO ₂ , TOC, HCl, HF a NH ₃	76
6.7	Vyhodnocení množství tvorby TZL.....	83
6.8	Vyhodnocení složení emisí TZL a Hg	87
6.9	Identifikace kritických míst teplosměnných ploch z hlediska jejich zanášení	90
6.10	Srovnání odhadovaných a reálně naměřených emisí.....	93
7	Komplexní vyhodnocení a doporučení do praxe	98
	Závěr	101
	Související aktivity	103
	Publikace.....	103
	Zapojení do výzkumných projektů	104
	Konference	104
	Patenty, užité vzory a funkční vzorky.....	104
	Použitá literatura	106
	Seznam zkratk.....	115

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. Spoluspalování odpadu vede ke snížení míry skládkování, snižuje jeho negativní dopady na ekologii, vede ke snížení množství spalovaných fosilních paliv a vede k maximálnímu využití jeho energetického potenciálu. 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 spoluspalování 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. Spoluspalování výše zmíněných paliv v současných spalovacích zařízeních přináší provozní problémy například v podobě zvýšené koroze spalovacího zařízení a spalinových cest. Právě chlorová koroze je důvodem, proč je obsah chloru v alternativních palivech přísně monitorován. Dle [1] je při obsahu chloru v palivu menším než 0,15 % riziko chlorové koroze nízké, zatímco při hodnotě 0,35 % je již riziko vysoké. Dalšími negativními důsledky spalování alternativních paliv v běžných spalovacích zařízeních může být tvorba nápeků na teplosměnných plochách, slinování popelu, kontaminace slínku v cementářské výrobě atd. Tyto negativní vlivy zapříčiňují snížení účinnosti zařízení, zvyšují provozní náklady nebo snižují životnost zařízení. Přesto je spoluspalování alternativních paliv perspektivní směr s velkým přesahem do budoucna.

Práce pomůže najít vhodné směsi tuhých paliv pro cementářský a vápenářský průmysl, spalovny průmyslových odpadů, případně i elektrárny a teplárny s kotli na tuhá paliva. Právě spoluspalování alternativních paliv je stále více intenzivní trend získávání tepelné energie, jehož význam v budoucnu jen poroste. Vhodná volba palivové směsi povede k minimalizaci tvorby úsad na teplosměnných plochách a ve spalinových cestách, které jsou zodpovědné za snížení účinnosti přenosu tepla a zvýšení provozních nákladů.

Nalezení vhodných směsí tuhých alternativních paliv, které budou schopny zpracovat nejen spalovny komunálních odpadů ale i elektrárny či teplárny s kotli na tuhá paliva, výrazně sníží náklady na dopravu a její ekologickou zátěž. Potenciální rozšíření základny spalovacích zařízení schopných zpracovat tuhá alternativní paliva výrazně přispěje k optimalizaci dopravní logistiky při nakládání s odpadem [2, 3]. Klíčem je zpracování odpadu bez nutnosti jeho transportu do větších vzdáleností.

Spalování alternativních paliv probíhá ve velké míře například v cementářských rotačních pecích. Je odhadováno, že až 40 % celkového potřebného tepla v peci může být dodáno prostřednictvím těchto paliv. Je však nutné monitorovat jejich složení

(zpravidla velmi variabilní), neboť jejich nespalitelné složky mohou kontaminovat finální produkty rotační pece (například cementárenský slínek) a tím snížit jeho kvalitu. Nosnou prací této problematiky je dizertační práce Nielsena z roku 2012 [4]. V této práci je popisována například problematika odlišné doby potřebné k uvolnění těžkých látek jednotlivých druhů alternativních paliv. S ohledem na tento problém je zapotřebí uvážlivě volit zdržnou dobu paliva v rotační peci tak, aby nedocházelo ke kontaminaci slínku nevyhořelými zbytky paliva.

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.

Na základě experimentálně zjištěných dat jsou formulovány hlavní závěry a doporučení pro praxi. Tato doporučení povedou k nalezení vhodnějších směsí tuhých paliv spalovaných v cementárnách, vápenkách, spalovnách průmyslového odpadu, případně i v elektrárnách s kotli na tuhá paliva. 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.

Hlavní výzkumnou metodou je experimentální ověření přímým spalováním různých paliv v poloprovozní rotační peci. Tato metoda byla zvolena s ohledem na výše uvedené hypotézy. Jedná se o metodu, u které lze díky využití poloprovozní rotační pece předpokládat přenositelnost dosažených výsledků na podmínky v průmyslu.

Alternativní metodou ověření studovaného vlivu je například výpočetní modelování nebo využití metod CFD (Computational Fluid Dynamics). Metoda zjištění studovaného vlivu prostřednictvím poloprovozních zkoušek byla zvolena pro věrohodnost a blízkost reálným průmyslovým podmínkám. Volba metody experimentálního ověření byla zvolena také s ohledem na využití experimentální základny Ústavu procesního inženýrství (ÚPI). Cíle této práce jsou v souladu s projektovými výzkumnými záměry ÚPI. Díky tomu bylo zajištěno financování investic do nutných úprav původní poloprovozní technologie (viz kapitola 4.3). V rámci těchto investic vzniklo unikátní výzkumné zařízení schopné věrně simulovat provozní podmínky dosahované v průmyslu. Toto zařízení bude dále sloužit pro vědecké účely a záměry ÚPI FSI VUT v Brně.

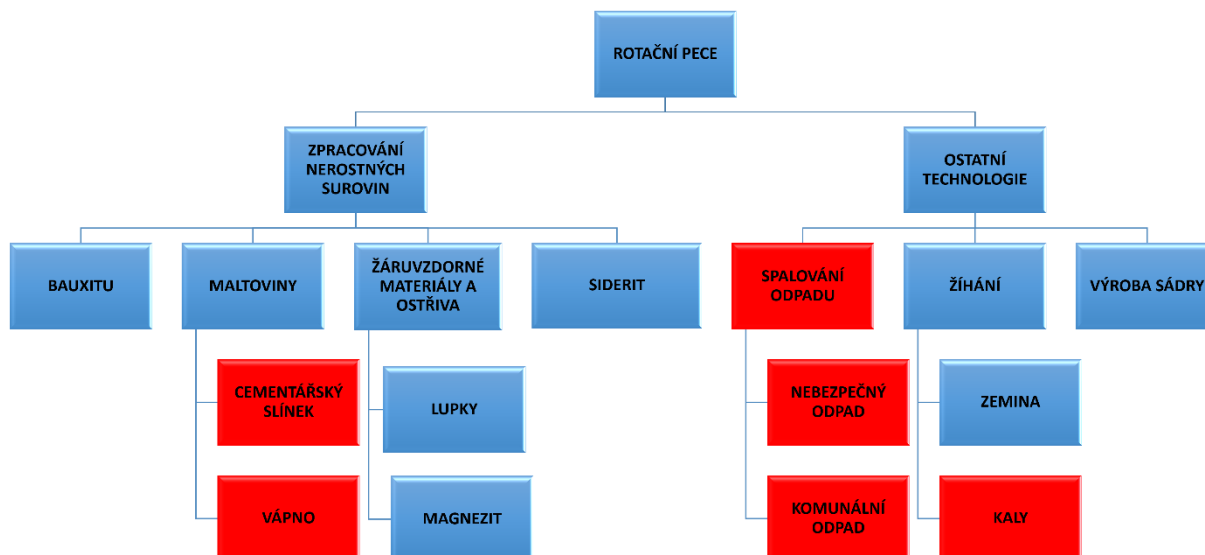
Rotační pec (Obr. 1) je ve své podstatě ocelový válec, který rotuje kolem své osy. Tato osa je zpravidla skloněna vůči vodorovné ose v určitém úhlu (tzv. *sklon pece*). Právě *rychlost rotace* a *sklon pece* zásadně ovlivňují její provozní parametry. Posuv materiálu v podélném směru je zajištěn gravitační silou, zatímco posuv materiálu v radiálním směru zajišťuje rotace pece. Ohřev pece může probíhat několika způsoby. Jedním z nich je instalace hořáku na plynná či kapalná paliva do podélné osy pece. Rotační pec dělí na pece s přímým a nepřímým ohřevem v závislosti na tom, zda se zpracovávaný materiál (vsázka) dostává do přímého kontaktu se spaliny nebo ne. Aplikace, kde kontakt mezi vsázkou a spaliny není žádoucí, vyžadují použití pece s nepřímým ohřevem. Tyto pece mohou být vyhřívány například parou proudící v trubkách ve vnitřním prostoru spalovací komory. Během experimentální části práce byla poloprovozní rotační pec ohřívána přímo hořákem na zemní plyn v souproudečném režimu.



Obr. 1 Poloprovozní rotační pec na Ústavu procesního inženýrství Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně

Vsázka může být spalovacím prostorem transportována ve stejném směru, v jakém proudí ohřevné médium. Toto uspořádání se nazývá souproudé. V opačném případě se jedná o protiproudé uspořádání. Protiproudé uspořádání je typické například pro cementové pece, kdy je zapotřebí vsázku nejprve pozvolna ohřát. Maximální teploty jsou u tohoto typu uspořádání dosaženy až na konci všech procesů, ke kterým dochází během průchodu rotační pecí. Příkladem aplikace se souproudým uspořádáním rotační pece může být spalovna odpadů.

Uplatnění rotačních pecí je široké. Na Obr. 2 je znázorněno schéma rozdělení rotačních pecí dle jejich průmyslové aplikace. Červeně jsou zvýrazněny aplikace, se kterými souvisí tato práce. Jedná se o aktuální témata, která jsou často citována v domácí i zahraniční literatuře. Jejich dopad se týká nejen nakládání s komunálními a průmyslovými odpady, optimalizace spalovacích procesů, zvýšení účinnosti spalovacích zařízení a zařízení pro přenos tepla, ale také snížení ekologické zátěže, dopravní náročnosti, či zlepšení ekonomiky provozu několika průmyslových odvětví.



Obr. 2 Přehled průmyslových aplikací rotačních pecí se zvýrazněním oblastí, kterým se věnuje tato práce

Popis dílčích cílů vedoucích k hlavnímu záměru této práce je uveden v Tab. 1, která rovněž obsahuje klíčové metody použité při řešení vytyčených cílů. Cíle práce jsou orientovány na aktuální společenské i průmyslové problémy a to tak, aby zapadaly do nejnovějších výzkumných směrů ostatních výzkumných pracovišť po celém světě. K důkladnému ověření vhodné volby těchto cílů slouží první dílčí cíl, který lze shrnout jako popis současného stavu poznání. Jedná se o analýzu relevantní domácí i zahraniční literatury. Použitými databázemi byly Science Direct a Web of Science. Analyzované články byly výzkumného i přehledového (review articles) charakteru. Klíčová slova byla zvolena tak, aby byly nalezeny články s vyváženým poměrem relevance tématu, kvality zdrojů a rozsahem studované databáze. Výstup tohoto dílčího cíle je uveden v kapitole 3.

Na základě důkladné analýzy současného stavu poznání byly formulovány další dílčí cíle práce. K provedení experimentální části práce v podobě spalovacích zkoušek bylo zapotřebí přizpůsobit původní experimentální zařízení pro jejich zkoušek. Úprava spočívá 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. Popisu experimentálního zařízení a jeho úprav pro požadavky plánovaných zkoušek se věnuje kapitola 4. Nová experimentální jednotka je schopna vyhodnotit míru tvorby znečišťujících látek, je tedy osazena měřicí aparaturou. Dalším krokem po montáži jednotky byla formulace metodiky měření s ohledem na základní principy plánovaného experimentu. Dále byl sestaven harmonogram zkoušek, požadavky na lidské zdroje během experimentů a byly stanoveny podmínky, za kterých proběhlo měření experimentálních dat. Toto měření bylo navrženo s ohledem na jeho opakovatelnost a možnost experimentální validace dat. Formulace metodiky experimentuje popsána v kapitole 5.

Následnou realizaci experimentu a vyhodnocení experimentálních dat souhrnně představuje kapitola 6, zatímco komplexní zhodnocení provozních poznatků a doporučení pro praxi představuje kapitola 7. Cílem experimentů byl sběr kvalitních a relevantních dat pro specifikaci vhodné palivové směsi pro uplatnění v průmyslové

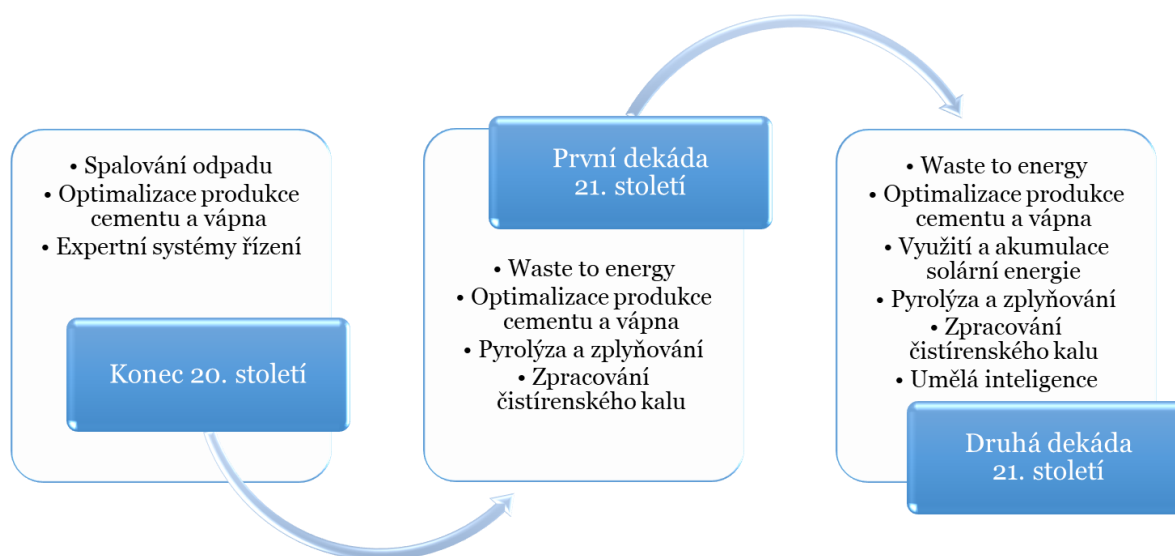
praxi s ohledem na bezpečnost práce během těchto zkoušek. Nejprve byla veškerá experimentální data soustředěna do jednotné databáze a následně byla statisticky vyhodnocena. Na základě zjištěných poznatků jsou formulovány hlavní výsledky, zodpovězeny vstupní hypotézy a vydána doporučení pro praxi.

Tab. 1 Popis dílčích cílů dizertační práce s představením použitých metod

	Dílčí cíl	Použité metody	Kap.
1	Současný stav poznání	Rešerše literatury z databází Science Direct, Web of Science; klíčová slova: Rotary kiln, alternative fuel, sewage sludge, biomass, RDF, co-firing, fouling	3
2	Příprava a popis experimentálního zařízení	Technologické úpravy stávající a konstrukční návrh nové experimentální jednotky (včetně instalace); nákup materiálu a provozních částí	4
3	Formulace metodiky experimentu a příprava experimentu	Sestavení plánu spalovacích zkoušek, sestavení provozních podmínek spalovacích zkoušek, volba paliv a jejich směsí zapojení a kalibrace měřicí techniky	5
4	Realizace experimentu	Provedení poloprovozních testů a jejich vyhodnocení	6
5	Komplexní vyhodnocení a doporučení do praxe	Komplexní zhodnocení provozních poznatků; formulace doporučení pro praxi	7
	Hlavní cíl	Specifikace vhodné směsi alternativních paliv pro uplatnění v průmyslové praxi s ohledem na emisní tvorbu a zanášení potrubních tras	

3 Současný stav poznání

Za posledních 30 let jsou ve vývoji a výzkumu souvisejícím s rotačními pecemi patrné určité nosné trendy. Na konci 20. století se jednalo hlavně o výzkum spalování odpadů a jeho pyrolýzu. První dekáda 21. století byla charakteristická počítačovým modelováním procesů v rotačních pecích a optimalizací výroby cementu a vápna. Poslední dekáda se ve výzkumu rotačních pecí zaměřuje na využití solární energie včetně její akumulace, dále pak na nakládání s čistírenskými kalů (což je zapříčiněno legislativními úpravami, které omezují aplikaci těchto kalů v rostlinné výrobě) a v určité míře také na využití umělé inteligence v řídicích procesech. Výše zmíněné výzkumné směry byly vybrány jako typické pro jednotlivé dekády. Pro úplnost je však nutné podotknout, že se všechny tyto výzkumné aktivity (až na umělou inteligenci) prolínají celým zmiňovaným obdobím. Vývojové trendy jsou shrnuty v Obr. 3.



Obr. 3 Trendy ve výzkumu a vývoji rotačních pecí

Tato kapitola analyzující současný stav poznání v oblasti výzkumu rotačních pecí se týká všech tří etap popsanych Obr. 3. Zkoumaná problematika tedy není nová, ale je stále aktuální. 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 CO₂. Obnovitelným zdrojem energie je například biomasa [5]. 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 [6]. 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) [7]. 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.

Příkladem státu s efektivním i udržitelným odpadovým a energetickým hospodářstvím může být Švédsko. To patří v této oblasti do evropské špičky. Množství skládkovaného odpadu zde není vyšší než 5 % z celkového množství. Zbylý odpad je recyklován nebo energeticky využit. Klíčem k tomuto stavu je kvalitní legislativa, která prodražuje skládkování a zakazuje skládkování odpadu, který lze energeticky využít. Kromě zařízení ZEVO (v provozu se jich nachází 32) ve Švédsku fungují také četná zařízení pro spalování alternativních paliv [8].

Následující rešerše sleduje současný stav poznání z perspektivy hlavní motivace práce, kterou je potřeba vyššího zastoupení alternativních paliv v palivovém mixu.

3.1 Umělá inteligence v řízení rotačních pecí

V souvislosti s rotačními pecemi byla zkoumána možnost řízení vnitřních procesů pomocí umělé inteligence. Jak dokládá Obr. 3, tato výzkumná oblast nabývá na významu až v posledním desetiletí. V rotačních pecích dochází během jednoho průchodu vsázky hned k několika různým procesům, které navazují jeden na druhý. Jedná se například o sušení, ohřev a kalcinaci vsázky v cementářské rotační peci apod. Nejenže je nutné dodržet správné teploty, ale na těchto teplotách je také nutné dodržet požadovanou zdržnou dobu, aby mohl každý dílčí proces proběhnout kompletně. Pro řízení těchto komplexnějších procesů lze tedy s výhodou využít umělou inteligenci. Rozsáhlý přehled použití umělé inteligence ve spalovacích procesech obecně včetně rotačních pecí zpracoval Kalogirou, 2003 [9].

Komplexnost procesu spalování v cementářské rotační peci je spojena také s velkým množstvím nelinearit. Wang a kol., 2020 [10] vytvořil algoritmus, který je nejen schopen řídit tento proces, ale navíc je schopen optimalizovat celkovou tvorbu emisí NO_x. Li a kol., 2019 [11] využil možnosti umělé inteligence, konkrétně neuronových sítí, aby zkoumal spalování uvnitř rotační pece pomocí sekvence obrázků plamene. Model byl testován s použitím reálných dat. Přesnost predikce tohoto modelu byla více než 93 %. Tato metoda má velký potenciál pro komerční využití.

Vedle využití výpočetní techniky pro řízení procesů v rotačních pecích pomocí umělé inteligence lze výpočetní techniku využít i pro modelování procesů. Jedná se například o metodu Computational Fluid Dynamics metod (CFD) nebo Discrete Element Method (DEM). DEM může být využita pro analýzu pohybu částic uvnitř rotační pece. Výzkum provedený Finniem a kol., 2005 [12] zkoumal pomocí DEM vliv hlavních provozních podmínek jako stupeň zaplnění a rychlost rotace na míchání částic v podélném i radiálním směru. Na základě výsledků bylo zjištěno, že difúzní koeficient (označuje hmotnost materiálu difundujícího jednotkou plochy za jednotku času) roste lineárně s rychlostí rotace. Vliv stupně zaplnění na difúzní koeficient byl vyhodnocen jako minimální. Míchání materiálu roste (do určité míry) s rychlostí rotace a také s rostoucím stupněm zaplnění [12].

Využití počítačového modelování, popřípadě umělé inteligence pro návrh nebo provoz rotačních pecí má velký potenciál ve snižování investičních i provozních nákladů. V průmyslové praxi se prozatím řízení pomocí umělé inteligence nevyskytuje. Většina pecí je řízena standardním spojitým řízením na základě expertních zkušeností operátorů.

3.2 Spalování alternativních paliv při výrobě cementu a vápna

Spoluspalování alternativních paliv při výrobě cementu je z hlediska využití jeho energetického potenciálu velmi výhodné. Mezi tato paliva zpracovávaná v cementárnách patří například odpadní pneumatiky, vyříděné odpady, průmyslové odpady atp. Růst cen základních paliv zvýšil ekonomickou smysluplnost zpracování dalších odpadů certifikovaných jako TAP. Jedná se o směsné plasty, textil, textilní vlákno, koberce, pryž, pneumatiky, papír, plasto-papírové kompozitní obaly, dřevo, dřevotřísku atp. [13].

Zpracování TAP v rotačních pecích v cementárnách a vápenkách je výhodné díky vysokým provozním teplotám, při kterých nedochází k tvorbě toxických plynů. Zbylé popeloviny jsou absorbovány do cementářského slínku, popřípadě do podsítných podílů vápna. Z tohoto důvodu je nutné sledovat složení a množství popelovin alternativního paliva, neboť by mohlo dojít ke snížení kvality slínku. V cementářském a vápenickém průmyslu se TAP používá výhradně pro výpal slínku a šterkového vápna pro spalování v pecních linkách s rotačními pecemi [14]. Zpracování TAP v cementárnách a vápenkách vykazuje problém z hlediska odbytu, neboť jejich produkce není na rozdíl od produkce TAP konstantní. Pro širší uplatnění TAP je tedy zapotřebí zajistit stabilní odbyt [15].

Výroba cementu a vápna je obecně velmi energeticky náročná a produkuje velké množství emisí CO₂. Ishak a Hashim, 2005 [16] se zabývali touto problematikou a výsledky shrnuli do několika přístupů vedoucích ke snížení těchto emisí:

- využití technologií s vysokou provozní účinností,
- využití odpadního tepla,
- využití alternativních paliv,
- zachytávání a uskladnění CO₂ [16].

Rahman a kol., 2003 [17] vytvořili studii, ve které zkoumali vliv použití alternativních paliv na kvalitu cementářského slínku. Dle výsledků může mít použití alternativních paliv pozitivní dopad na tvorbu prachových částic a také na emise NO_x a SO₂.

Nakládání s rozemletými odpady z automobilové produkce zkoumal Vermeulen a kol., 2011 [18]. Spalování v rotační peci nebo spoluspalování v cementářské peci je jednou z možností nakládání s těmito druhy odpadů. Jiný výzkum provedený Lemieuxem a kol., 2004 [19] byl zaměřen na spoluspalování odpadních koberců v cementářské rotační peci. Bylo zjištěno, že až 30 % celkového dodaného tepla může být dodáno právě tímto typem odpadu. Navíc spoluspalování koberců nemá negativní dopad na tvorbu CO. Na druhou stranu bylo pozorováno mírné zvýšení produkce emisí NO_x, neboť koberce obsahují dusík v nylonových vláknech [19].

Také masokostní moučka je často spalována v cementářských rotačních pecích, je však zapotřebí kontrolovat obsah chloridů, které mohou mít negativní vliv na životnost zařízení. Masokostní moučka také může kontaminovat slínek fosfáty, které mají negativní vliv na jeho vlastnosti [20].

Jak již bylo uvedeno, spoluspalování odpadů v rotačních pecích je při výrobě cementu běžně využíváno. Příkladem těchto odpadů jsou odpadní pneumatiky, čistírenský kal anebo další průmyslový odpad. Potenciál spoluspalování alternativních zdrojů energie

se odhaduje na asi 40 %. Jinými slovy 40 % fosilních paliv potřebných při výrobě cementu může být nahrazeno obnovitelnými zdroji. Vyšší zastoupení alternativních paliv tedy vede k zásadním úsporám fosilních zdrojů, což je naprosto klíčové pro dlouhodobou udržitelnost tohoto průmyslového odvětví. Při výrobě cementu za použití pouze fosilních paliv vzniká přibližně 0,85 tuny CO₂ na jednu tunu vyrobeného cementu. Potenciální snížení tvorby CO₂ při spoluspalování obnovitelných paliv je asi 300 kg CO₂ na jednu tunu cementu [16]. Popílek, vzniklý při spalování biomasy, ovlivňuje kvalitu slínku. Jeho mineralogické složení tedy musí být, jak uvádí Rehfeldt a kol., 2020 [5], kontrolováno.

Velmi komplexní vhléd do této problematiky představil ve své dizertační práci Nielsen, 2012 [4]. Zkoumaným odpadem byly odpadní pneumatiky, průmyslový odpad, dřevní štěpka, čistírenský kal, papír, plast a masokostní moučka. Součástí této dizertační práce bylo také experimentální ověření na poloprovozní rotační peci. Během těchto experimentů bylo zkoumáno zpracování velkých částic odpadů bez předchozí úpravy (bez drcení). Bylo zjištěno, že doba potřebná k uvolnění těkavých látek, je u dřeva a pneumatik při velikosti částic okolo 20 mm přibližně 2 minuty. U zuhelnatělých částic (například pyrolýzních produktů) je však tato doba výrazně delší, což může vést k nedokonalému spálení uhlíku a kontaminaci slínku nadměrným množstvím tohoto prvku s negativním dopadem na jeho kvalitu. Důsledné spálení uhlíku je tedy nutné monitorovat. Na rychlost jeho spálení má vliv nejen rychlost rotace pece a provozní teplota, ale také velikost částic, jejich tvar, stupeň zaplnění pece nebo koncentrace kyslíku [4].

Spalování alternativních paliv, jako jsou odpadní pneumatiky, TAP apod. je ve velké míře uplatňováno v reálných průmyslových podmínkách zejména v cementárnách. Současný výzkum se zaměřuje na limity spoluspalování těchto paliv. Při vyšší míře náhrady fosilních paliv těmi alternativními dochází ke snížení kvality slínku, případně ke zvýšení tvorby prachových částic.

Tato dizertační práce navazuje na současný stav výzkumu s cílem rozšířit základnu spalovacích zařízení, kde bude možné alternativní paliva spalovat. Nalezení vhodné palivové směsi z alternativních paliv, kterou bude možné spalovat v širokém spektru běžně používaných spalovacích zdrojů, povede ke zlepšení dopravní logistiky, snížení míry skládkování a snížení závislosti na fosilních zdrojích energie.

3.3 Zpracování odpadu pyrolýzou v rotační peci

Ve srovnání s fosilními palivy se u alternativních paliv vyskytuje významný problém se skladováním. Toto palivo může být nestálé, může během skladování vypouštět nepříjemné pachy a teplo. Jedná se například o nevysušenou biomasu či čistírenský kal. Těmto problémům je zapotřebí čelit, neboť nejen v cementárenské výrobě je produkce během roku nestálá a paliva je nutné po určitou dobu uskladnit. Řešením nejen tohoto problému může být pyrolýza materiálu v rotačních pecích. Pyrolýza je název pro termické zpracování materiálu bez přístupu kyslíku. Tab. 2 uvádí základní rozdělení typů pyrolýzy.

Tab. 2 Rozdělení základních typů pyrolýzy včetně jejich typických teplot, zdržné doby, produktu a technologie [21]

Typ pyrolýzy	Zdržná doba	Tep. (°C)	Technologie (běžně používané typy reaktorů)	Produkt
Rychlá	krátká	400 – 600	Fluidní lože, „spouted bed“ reaktor, šnekový reaktor	tekutý
Středně rychlá	od sekund do minut	400 – 600	Rotační pec, šnekový reaktor, reaktor s pevným ložem reaktor s pevným ložem	tekutý, tuhý i plynný
Pomalá – Torrefaction	od minut do hodin	250 – 350	Rotační pec, šnekový reaktor, reaktor s pevným ložem reaktor s pevným ložem	tuhý
Pomalá – Karbonizace	od hodin do dnů	300 – 500	Rotační pec, šnekový reaktor, reaktor s pevným ložem	tuhý

Malkow, 2004 [22] uvádí, že pyrolýza je vhodnějším způsobem nakládání s komunálním odpadem, než je jeho spalování. Tuto myšlenku podporuje tvrzením, že při pyrolýze odpadu nevznikají škodlivé emise. Vliv provozních podmínek (zdržná doba, teplota) na chemické a mineralogické složení finálního produktu z pyrolýzy odpadu studovali například Czajczyńska a kol., 2017 [23] nebo Chen a kol., 2014 [24]. Li a kol., 1999 [25] zkoumal různé typy pyrolýzy komunálního odpadu a dřeva v rotační peci. Z jeho výsledků vyplývá následující:

- Rychlý ohřev vykazuje vyšší produkci plynů než pomalý.
- Během procesu pyrolýzy se mění spalné teplo a složení produkovaného plynu.
- Spalné teplo nejprve s teplotou roste, potom klesá.
- Vlhkost vsázky má větší vliv na kvalitu produktu než velikost jejich částic.

Pyrolýzu kokosových skořápek v poloprovozní rotační peci zkoumal Promdee a kol., 2017 [26]. Finálním produktem bylo aktivní uhlí a uhelné brikety. Hlavní závěry tohoto výzkumu lze shrnout takto:

- Finální produkt splňoval chemické i fyzikální požadavky.
- S rostoucí teplotou roste kvalita finálního produktu.
- Při teplotách v rozmezí od 400 do 600 °C bylo spalné teplo aktivního uhlí přibližně 26 MJ/kg, zatímco spalné teplo uhelných briket bylo 22 MJ/kg [26].

Některé pyrolýzní systémy si už našly v praxi své místo. Největší rotační pec na pyrolýzu biomasy je provozována v Japonsku. Její kapacita je 100 tun biomasy

za den [27]. Hlavní výhody a nevýhody použití rotačních pecí pro zplyňování biomasy jsou dle Rena a kol., 2020 [28]:

- Schopnost zpracovat různé druhy biomasy s odlišnými vlastnostmi,
- schopnost flexibilně měnit dávkování materiálu,
- možnost zpracovat velké množství materiálu,
- jednoduchá konstrukce, vysoká spolehlivost a relativně nízké investiční náklady,
- obtížné řízení vstupní teploty materiálu,
- nízká účinnost a vysoké provozní náklady.

Potenciálně velmi zajímavým propojením dvou výzkumných směrů může být zpracování digestátu z bioplynových stanic pyrolýzou v rotační peci. Digestát je pozoruhodným obnovitelným zdrojem. Jeho výhřevnost je však nízká vzhledem k vysokému obsahu vody. Monlau a kol., 2015 [29] zkoumal možnost jeho zpracování v křemíkové rotační peci o délce 0,8 metru a vnějším průměru 0,03 m. Experiment byl proveden za tři různých teplot (400, 500 a 600 °C), za atmosférického tlaku, v dusíkové atmosféře se zdržnou dobou na maximální teplotě asi 10 minut. Odpadní teplo bioplynové stanice pokrylo množství tepla potřebné pro vysušení digestátu. Finální produkty procesu byly syntetický plyn (přibližně 9 hm. % vsázky), syntetický olej (58 hm. %) a uhlí (33 hm. %). Výhřevnost syntetického plynu byla naměřena jako necelých 16 MJ/m³, zatímco spalné teplo oleje po jedné extrakci vody bylo přes 23 MJ/kg. Tato technologie byla vyhodnocena jako smysluplná a může přispět ke zlepšení ekonomiky provozu bioplynových stanic.

Dle dostupných informací je v současné době již více než rok v provozu v České republice první pyrolýzní jednotka na zpracování čistírenského kalu (ČK). Tato jednotka se nachází v Trutnově. Bližší informace nejsou bohužel známy. Výraznému rozšíření použití pyrolýzních systémů v praxi prozatím brání relativně vysoké provozní náklady a nižší účinnost. Pokud však dojde k legislativním úpravám, které nakládání například s čistírenským kalem prodraží, může dojít k masivnímu rozšíření této technologie. Z technického hlediska se jedná o propracovanou a funkční technologii.

3.4 Aplikace rotačních pecí při využití a akumulaci solární energie

Jak je uvedeno v Obr. 3, velká pozornost výzkumných pracovníků v oblasti rotačních pecí je v poslední době věnována využití solární energie. Tato energie může být vhodnou náhradou fosilního paliva. Jednou z možností je zpracování odpadu pyrolýzou v solárním rotačním reaktoru. Pro experimenty provedené Grassmannem a kol., 2015 [30] byla jako materiál zvolena pšeničná sláma. Spalné teplo tohoto materiálu se během experimentu zvýšilo z přibližně 17 MJ/kg na přibližně 24 – 28 MJ/kg. Doba zpracování 5 kg vsázky byla 2 hodiny. Během jednoho slunného dne lze v tomto reaktoru zpracovat přibližně 20 kg vsázky.

Alonso a kol., 2017 [31] shrnul výhody a nevýhody použití solárních systémů s rotačními pecemi takto:

- Vysokoteplotní aplikace tohoto systému (až 2000 °C) vyžadují drahé a obtížně dostupné materiály.

- Pro minimalizaci nežádoucího zpětného přenosu tepla je výhodné navrhnout vstupní otvor do rotační pece s menším průměrem, než je průměr vlastní pece.
- Budoucí výzkum by měl být zaměřen na metalurgii specifických materiálu, jako jsou olovo, měď nebo železo.

Využití solární energie a její akumulace prostřednictvím rotačních pecí je prozatím testováno pouze v laboratorních a poloprovozních podmínkách. Prosazení této technologie prozatím brání nízká účinnost a vysoké investiční náklady.

3.5 Využití rotačních pecí pro zpracování čistírenského kalu

Čistírenský kal je prozatím nejvíce využíván v rostlinné výrobě. Legislativní úpravy, které omezují toto použití z důvodu zvýšeného obsahu těžkých kovů a další kontaminantů, však tuto situaci postupně mění. Jak dokládá Obr. 3, v poslední dekádě je věnováno značné úsilí problematice nakládání s ČK. Vedle termického zpracování je perspektivním procesem také pyrolýza tohoto odpadu.

Státy s rozvinutou ekonomikou produkují větší množství čistírenského kalu než rozvíjející se státy, což je důsledkem jejich vyspělejší infrastruktury. Lze předpokládat, že množství kalu, které bude nutné nějakým způsobem zpracovat, v budoucnu poroste [32]. Za posledních 20 let je nakládání s čistírenskými kalu stále více sledováno a omezováno z důvodu možného vysokého obsahu těžkých kovů a dalších kontaminantů. Problematická je nízká výhřevnost ČK, jejíž hodnota navíc bývá proměnlivá [33]. Existuje několik technologií, ve kterých dochází ke zpracování/spalování čistírenského kalu (ČK). Jejich přehled vytvořil Werther a Ogada, 1999 [34]. Přestože je spalování ČK v rotačních pecích možné a v některých případech i výhodné, nejčastějším typem spalování ČK je ve fluidním loži. Schnell a kol., 2020 [35] doporučil zakomponovat rotační pec do spalovny a využít její odpadní teplo pro vysušení, ohřev a spálení ČK. Jedná se o perspektivní koncept.

Vhodným způsobem likvidace ČK je spalování v cementárenských pecích, kde díky vysokým provozním teplotám dochází ke zneškodnění nebezpečných a škodlivých látek. Experiment vykonaný Podedwornou a Umiejewskou, 2008 [36] nepotvrdil obavy, že spoluspalování ČK v cementárenské peci povede k překročení emisního limitu pro rtuť. Tento limit byl dodržen. Navíc je alkalické prostředí v rotační peci schopné chemicky zachytit molekuly kyselin. Díky tomu se tyto kyseliny nedostanou se spaliny do atmosféry, ale zůstanou zachyceny v popílku [37]. Spaluspalování ČK, odpadních pneumatik a masokostní moučky v cementárenské peci studoval Horsley a kol., 2016 [38].

Optimalizaci procesů použitím inovovaného uspořádání čističky odpadních vod představil Gikas, 2017 [39]. V tomto případě byla rotační pec použita za šnekovým lisem za účelem snížení vlhkosti z 55 na 20 %. Dle výsledků vykazuje nové uspořádání vyšší účinnost.

Stále se zvyšující poptávka po fosforu, který je důležitou součástí hnojiv, vede ke hledání nových způsobů jeho recyklace. Zpětné získání fosforu z ČK studoval Cohen, 2006 [40]. Technologie AshDec® využívá pro získání fosforu z ČK jeho spalování v rotační peci. Princip metody spočívá ve smíchání ČK s aditivou. Tato aditiva způsobí navázání fosforu do polétavého popílku, který je následně zachycen na částicových

filtrech. Do popílku jsou poté přimíchány další příměsi, směs je peletizována a ochlazena. Tato technologie byla v provozu od roku 2005 do 2008 v sousedním Rakousku, její kapacita byla 4 tuny kalu za hodinu [41]. Lze předpokládat, že použití podobných technologií bude v důsledku vysoké poptávky po fosforu stále častější.

Perspektivním procesem je zpracování ČK spolu s komunálním odpadem pyrolýzou v rotační peci. Tuto technologii studoval Shen a Zhang, 2003 [42]. Pomalá pyrolýza ČK a hnojícího odpadu byla provedena ve dvou do série zapojených rotačních pecích. Cílem experimentu bylo najít optimální podmínky pro zvýšení výnosů pyrolýzního oleje. Provozní teplota se pohybovala v rozmezí od 400 do 550 °C, zatímco zdržná doba od 20 do 60 minut. Bylo zjištěno, že [43]:

- Produkce pyrolýzního oleje roste s rostoucí teplotou a klesající zdržnou dobou.
- Největší výnosnost pyrolýzního oleje byla zaznamenána při teplotě 550 °C a zdržnou dobou 20 minut.
- S rostoucí zdržnou dobou klesá viskozita pyrolýzního oleje.
- Viskozita oleje z hnojícího odpadu je vyšší než viskozita oleje z ČK [43].

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.

3.6 Využití rotačních pecí pro likvidaci odpadních pneumatik

Recyklace odpadních pneumatik je nákladná. Pneumatiky vzniklé recyklací odpadních pneumatik mají navíc problémy s kolísající kvalitou [44]. Nejvíce používaným způsobem nakládání s odpadními pneumatikami je spoluspalování v cementárenských rotačních pecích [45]. Díky vysoké výhřevnosti odpadních pneumatik (až 40 MJ/kg) lze poměrně značnou část celkové tepla potřebného při výrobě cementu pokrýt spalováním tohoto odpadu [46]. Tato technologie vykazuje nízké provozní náklady, na druhou stranu vyžaduje složitější technologie čištění spalin [47].

Pneumatiky mohou být také zpracovány pyrolýzou v rotačních pecích. Dva experimenty (jeden v rotační peci a jeden v reaktoru s pevným ložem) pyrolýzy odpadních pneumatik provedl Diez a kol., 2005 [48]. Velikost zpracovávaných částic byla v rozmezí od 10 do 50 mm. Množství takto zpracovaného odpadu byla pro oba případy 20 kg při provozních teplotách 550 °C. Z důvodu odlišných najížděcích křivek byly zaznamenány mírně odlišné hodnoty výhřevnosti a složení finálního produktu. Tyto rozdíly však byly minimální [48]. Tento experiment byl proveden v rotační peci s dávkovým provozním režimem.

Rotační pec s kontinuálním přívodem vsázky použil pro obdobný experiment pyrolýzního zpracování odpadních pneumatik Li a kol., 2004 [49]. Teplota uvnitř pece se pohybovala v rozmezí od 450 – 650 °C. Nejvyšší výnos pyrolýzního oleje byl zaznamenán při teplotě 500 °C. Spalné teplo tohoto oleje bylo přibližně 40 MJ/kg. Velmi perspektivní myšlenkou je použití pyrolýzního oleje pro spalování v konvenčním dieslovém motoru. Dle výsledků prezentovaných Kumaravelem a kol., 2016 [50] je tato technologie provozuschopná.

Experiment související se zpracováním polévatého popílku ze spalování komunálního odpadu byl vykonán Huberem a kol., 2016 [51]. Polévatý popílek byl přidán do komunálního odpadu a následně spálen v rotační peci. Bylo zjištěno, že více než 90 % polévatého popílku bylo zachyceno v popelu na konci rotační pece.

Odpadní pneumatiky jsou snad nejběžnějším typem alternativního paliva spalovaného v rotačních pecích. Svoji pevnou pozici tato paliva mají díky své vysoké výhřevnosti dosahující až 40 MJ/kg zejména v cementárnách a vápenkách. Při vyšších procentech zastoupení tohoto paliva je však zapotřebí monitorovat kvalitu slínku. Perspektivní oblastí je také zpracování odpadních pneumatik prostřednictvím pyrolýzních systémů. Většímu rozšíření této technologie prozatím brání vyšší provozní náklady.

3.7 Charakteristika tuhých alternativních paliv a související legislativa v České republice

TAP jsou pro podmínky České republiky 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 spoluspalovacích zařízeních [52]. Tato kapitola pojednává o jednotlivých typech TAP, které jsou v ČR vyráběny a spoluspalovány.

Z hlediska legislativy je spalování TAP v ČR chápáno jako spalování odpadů. Emisní limit se řídí tzv. směšovací rovnicí. Ta říká, že pokud zařízení (například elektrárna) spoluspaluje 10 % TAP a 90 % uhlí, platí pro ni limit skládající se z 10 % emisního limitu spalovny a z 90 % emisního limitu elektrárny. Pokud tato elektrárna bude spalovat pouze TAP, platí pro ni emisní limit stejný jako pro spalovnu [53]. Do budoucna se předpokládá legislativní změna, na základě které bude platit emisní limit pro spalovnu pro všechna zařízení, která spalují odpad v jakémkoliv množství. Dojde tedy k zásadnímu zpřísnění.

Koncentrace těžkých kovů (TK) ve spalinách je stejně jako u ostatních znečišťujících látek legislativně limitována. TK se přirozeně nacházejí na zemském povrchu a účastní se řady biochemických a fyziologických procesů. Některé z nich jsou v lidském těle považovány za základní stavební mikronutrienty. Naopak toxické těžké kovy jako arsen, kadmium, chrom, olovo a rtuť mohou již v malých koncentracích poškodit lidské orgány. Pokud je lidský organismus dlouhodobě vystaven zvýšeným dávkám těžkých kovů, může být jeho fungování narušeno [54]. Například kadmium může způsobit selhání ledvin, reprodukčního systému, či osteoporózu. Měď, která je pro lidský organismus považovaná za esenciální kov, dokáže ve vyšších koncentracích způsobit silné průjemy, nevolnost, žaludeční křeče nebo zvracení. Podobné účinky je možné najít i u ostatních kovů [55].

Těžké kovy také významným způsobem ovlivňují vlastnosti půdního ekosystému. V půdě mají přímý vliv na vlastnosti půdy jako je pH, elektrická vodivost, kapacita výměny kationtů, mineralogie půdy, či mikrobiální a biologické aktivity [56]. Například zinek v půdě způsobuje nepravidelnou produkci, žloutnutí listů či zakrslé plodiny [57].

Spalování odpadů nebo jeho spoluspalování je možné pouze v určitém typu zařízení. Z tohoto hlediska lze rozlišit zařízení pro spalování TAP (monospalovna) nebo klasická

energetická zařízení, kde probíhá spalování TAP s fosilními palivy [13]. Při spalování je zapotřebí splnit požadavek "energetické účinnosti" dle směrnice 2008/98/ES. Její výpočet uvádí příloha č. 12 k zákonu č. 185/2001 Sb. Pro rozhodnutí, zda může být odpad skládkován, je rozhodujícím kritériem jeho výhřevnost. Limitní hodnotu stanovuje vyhláška č. 294/2005 Sb. Pokud výhřevnost odpadu v sušině překročí hodnotu 6,5 MJ, pak tento odpad musí být energeticky využit [58].

Podle složení palivové směsi (procentuálního zastoupení jednotlivých druhů odpadů) lze rozlišit následující zařízení [59]:

- spalovny tuhého komunálního odpadu (EVO, ZEVO)
- spalovny průmyslového a nemocničního odpadu
- využívání odpadů a alternativních paliv v cementárnách a vápenkách
- využívání odpadů a alternativních paliv v energetickém sektoru

Hlavní charakteristiky TAP jsou jeho výhřevnost a obsah chloru a rtuti. Od obsahu chloru se odvíjí další technické dopady spalování TAP. Obsah rtuti je sledovaný z environmentálních důvodů. V České republice se TAP vyrábí z průmyslových odpadů a z komunálního odpadu upraveného na třídících linkách [59]. Příkladem takových paliv může být TAP s komerčním názvem PALOZO (vyrábí OZO Ostrava s.r.o.). Toto palivo je spalováno v cementárnách a vápenkách. Skládá se z plastů, papíru, dřeva, textilu atp. [60]. Dalším příkladem TAP je ALTPAL MP-05 vyráběný přímo v areálu Cement Hranice a.s.. Jedná se o palivo z drcených pneumatik [61]. Palivo ASAPAL se ze 40 % vyrábí z textilií z automobilové výroby. Toto palivo vyrábí společnost FCC Česká republika, s.r.o. - provozovna Brno v rozsahu přibližně 22 tisíc tun ročně [62]. Toto palivo bylo spalováno během experimentální části této práce. Bližší popis je uveden v kapitole 6.1.3. Tab. 3 uvádí některá TAP včetně komerčního označení, složení směsi a základních fyzikálně-chemických charakteristik.

- Tab. 3 Typy TAP a jejich základní charakteristiky [63]

Palivo	Obchodní název TAP	Složení (směsi)	Výhřevnost	Popel
			MJ/kg	hm. %
lehká alternativní paliva	ASAPAL, PALOZO, TAP AZ1, AGLOMERAT, SERB, SERB REKLA, TAP 05	plasty, papír, textilie, dřevo, pryž	18 – 30	0 – 15
drcené pneumatiky	ALTPAL MP-05, PALTAS	úlomky pryže, tvrdé pryže (pneumatiky)	min. 24	15 – 25
těžká alternativní paliva	MKM	masokostní moučka	min. 17	19 – 30
	TPS NOL 01	upravené a stabilizované kyselé rafinační kaly	min. 15	15 – 20
ostatní	TPS NATUR	dřevní hmota a ropné dehtové úsady	20 – 25	5 – 20

Existuje několik způsobů zpracování TAP. Jedná se o spalování na roštu, spalování ve fluidním kotli, spoluspalování v uhelných kotlích, v cementárenských pecích. TAP lze také zplyňovat spolu s biomasou a uhlím [64].

V ČR se TAP vyrobený z průmyslových odpadů a materiálově nevyužitelných složek tříděného sběru komunálních odpadů spaluje zejména v cementárnách. Kvalita, množství a nakládání s TAP se řídí integrovaným povolením. Jakost tohoto paliva je vysoká díky zaručeným parametrům odpadů z průmyslové výroby. V Tab. 4 se nachází seznam zařízení spoluspalujících TAP v rotačních pecích v ČR [65].

Tab. 4 Seznam zařízení spoluspalujících TAP v ČR

Č.	Provozovatel	Provozovna	Kapacita spalovaného odpadu *[t/rok]	Množství spáleného TAP [t/rok]		
				2016	2017	2018
1.	Českomoravský cement, a.s.	Závod Králův Dvůr - Radotín, provozovna Radotín	88 000	6 167	9 267	17 079
2.	Lafarge Cement, a.s.	Lafarge Cement, a.s.	100 000	75 640	86 000	90 000
3.	CEMEX Czech Republic, s.r.o.	CEMEX Czech Republic, s.r.o.	85 000	88 981	86 225	82 294
4.	Českomoravský cement, a.s.	Cementárna Mokrá	113 800	60 250	60 119	71 707
5.	Cement Hranice, a.s.	Cement Hranice, a.s.	80 000	35 676	29 871	38 615

* Jedná se o projektovanou kapacitu, která byla stanovena na základě konkrétní výhřevnosti odpadu. Protože se výhřevnost odpadů mění, může ve specifických případech roční množství spáleného odpadu tuto kapacitu překročit.

Výroba a energetické využití TAP je v ČR běžnou praxí. Výhledem do budoucna je masivnější uplatnění těchto paliv například větším využitím tříděného komunálního odpadu. Příkladem tohoto paliva může být i TAP 1 spalovaný během experimentální části této práce (viz kapitola 6.1.2). Cílem této dizertační práce je mimo jiné také rozšířit množství spalovacích zařízení, kde bude možné tato paliva spalovat.

3.8 Výsledky z provozních zkoušek spalování alternativních paliv v České republice

Jak bylo řečeno v kapitole 3.2, spalování alternativních paliv v rotačních pecích v cementárnách je již zavedenou praxí. V České republice bylo provedeno několik provozních zkoušek spoluspalování 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. Ten bude schopen spalovat TAP s biomasou. V roce 2023, kdy se plánuje uvedení nové technologie do provozu, se předpokládá snížení emisí SO₂ o 76 % oproti roku 2017. Pro případ emisí oxidů dusíku je pokles roven přibližně 54 % a pro prachové emise 24 %. Průměrná výhřevnost plánovaného TAP je 12 MJ/kg [66].

Mimo výše zmíněný projekt v teplárně Karviná jsou plánovány i další modernizace stávajících zařízení s cílem nově spalovat TAP. Příkladem může být teplárna v Přerově [67] nebo zkoušky spoluspalování TAP (do 10 hm. %) ve fluidních kotlích ve stávajících elektrárnách Tisová, Hodonín a Poříčí [68].

Plzeňská teplárenská má od roku 2011 povoleno spoluspalovat TAP, biomasu a hnědé uhlí. Na kotli K6 může být spalováno TAP v maximálním množství 5 % z celkové hmotnosti hnědého uhlí a biomasa o maximálním množství 40 % celkového tepelného příkonu [69].

Spoluspalování alternativních paliv je evidentní trend, který není v malých procentuálních zastoupeních technologicky problematický. Cílem této práce je širší uplatnění těchto paliv nejen ve větším zastoupení v palivové směsi ale i v širším spektru spalovacích zařízení.

3.9 Provozní zkušenosti se spoluspalováním biomasy

Nejen kúrovcová kalamita ve střední Evropě vede výzkumné pracovníky i techniky z praxe k zamyšlení: Jak tento materiál co nejlépe zužitkovat? Následující text je věnován zejména spoluspalování biomasy, která je druhým nejčastějším typem v ČR spoluspalovaného alternativního paliva.

Spoluspalování uhlí a biomasy je náchylné k vyššímu obsahu částic pod 1 μm ve spalinách. V porovnání se spalováním samotného uhlí jsou tyto částice výrazně menší, což ovlivňuje účinnost odlučovačů těchto částic. Pokud však klesne podíl biomasy pod 10 %, jsou dle literatury tyto jevy ojedinělé [70]. 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 [71].

Spalování biomasy může v porovnání s uhlím vykazovat vyšší tvorbu popílku [72]. Alkalické kovy a také chloridy obsažené v biomase mají negativní vliv na zanášení teplosměnných ploch a mohou způsobit chlorovou korozi [73]. Sami a kol., 2001 [74] uvádí, že spoluspalování biomasy s uhlím vykazuje při 22 % zastoupení biomasy dvojnásobné zvýšení koroze.

Při spalování biomasy a uhlí v práškových kotlích (tento přístup je hojně realizován v Polsku) byly pozorovány tyto provozní problémy [75]:

- Pokles účinnosti kotle,
- nutnost mletí biomasy,
- značné množství alkalických kovů v popelovině (zanášení teplosměnných ploch),
- obsah chlóru zapříčiňující vznik škodlivých sloučenin na teplosměnných plochách,
- sláma problematická při použití s jinými palivy (nízká objemová hustota a vysoký obsah chloru a draslíku).

V České republice se spalování biomasy využívá například v elektrárnách ČEZ (Tisová, Hodonín, Poříčí), v teplárenských a průmyslových zdrojích ČEZ (Dvůr Králové, Plzeňská teplárenská, Teplárna Písek, Ško-Energo Mladá Boleslav, Mondi Štětí, Dalkia – Krnov, Olomouc, Teplárna Otrokovice atd.) [75].

Neupravená biomasa obvykle má vlhkost mezi 25 a 50 %, což značně snižuje její výhřevnost a komplikuje a prodražuje skladování. Navíc taková biomasa podléhá degradaci a uvolňuje plyny a teplo [72]. Nabízí se tedy možnost biomasy před uskladněním upravit například pyrolýzou, zplyňováním [76] nebo ji vysušit a peletizovat [73]. Těmito postupy dojde ke snížení objemu materiálu až o dvě třetiny [77].

Spalování biomasy je v České republice již relativně běžné. Negativní jevy spojené s tímto palivem jako jsou chlorová koroze či snížení teploty tavení popelu mohou být redukovány vhodnou volbou dalších složek palivové směsi a jejich vzájemných poměrů. Tento přístup diskutovaný v předkládané práci má opravdu velký potenciál.

3.10 Shrnutí poznatků z rešerše současného stavu poznání

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 systematičtější výsledky výzkumu vlivu složení paliva na tvorbu znečišťujících látek při spalování v rotačních pecích. Z tohoto důvodu se na tuto problematiku zaměřuje předkládaná dizertační práce.

TAP a paliva z biomasy mohou obsahovat látky, které způsobují nižší teplotu tavení popelu. Tento aspekt má zcela zásadní vliv na tendenci popelu k zapékání na teplosměnných plochách. Z tohoto důvodu je nutné teplotu tavení popelu při spalování zmíněných paliv pozorně monitorovat [78].

Velmi často diskutovaným problémem je spalování alternativních paliv v rotačních pecích. Některé technologie jsou již v praxi hojně využívány a ekonomika jejich provozu je příznivá. Jedná se například o spalování odpadních pneumatik v cementárnách a vápenkách. Příkladem technologie, která je provozuschopná, ale z důvodu nižší účinnosti a vyšších provozních nákladů zatím není v praxi rozšířena,

je zpracování materiálů pyrolýzou. V budoucnu však lze očekávat změnu této situace v důsledku legislativních změn (zejména při zpracování čistírenských kalů).

Použití rotačních pecí pro využití a akumulaci solární energie je progresivním směrem s velkým potenciálem. Z důvodu nízké účinnosti a vysokých investičních nákladů se tato technologie objevuje prozatím jen v laboratorních a poloprovozních podmínkách.

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. Konkrétní parametry vybraných paliv jsou představeny v kapitolách 6.1.1 až 6.1.6. Z rešerše dále vyplývá, že tvorbu nápeků ovlivňuje zejména poměr obsahu vody, popelovin a hořlaviny, obsah chloru (způsobuje chlorovou korozi) a obsah alkalických kovů (zejména vápník a draslík), které snižují teplotu tavení popela.

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

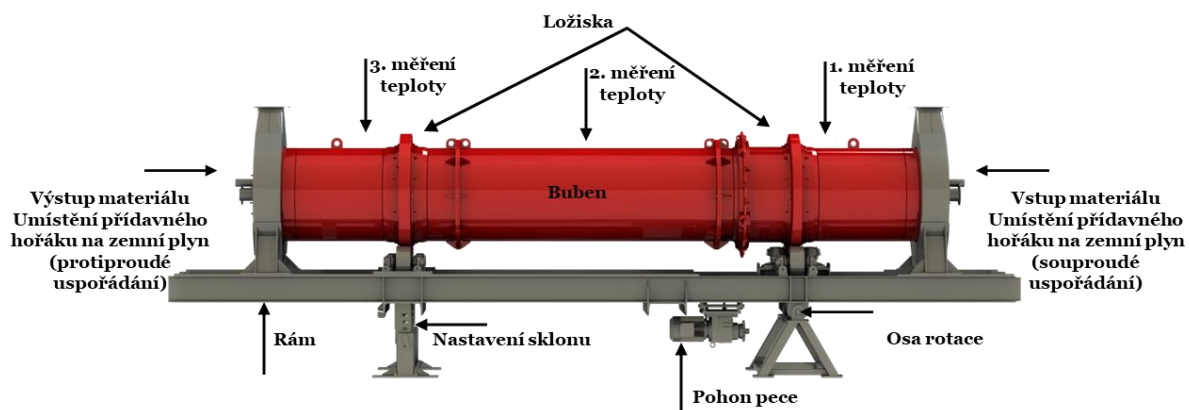
Jak bylo uvedeno v předchozích kapitolách, cílem této práce je specifikovat vhodnou směs alternativních paliv pro uplatnění v průmyslové praxi s ohledem na emisní tvorbu a zanášení potrubních tras. Z rešerše odborné literatury vyplývá, že nejčastěji používanými typy alternativních paliv jsou TAP z průmyslových nebo komunálních odpadů, odpadní pneumatiky, biomasa nebo čistírenský kal. Právě tato paliva byla vybrána pro spalovací zkoušky experimentální části této práce.

Při spoluspalování TAP a biomasy jsou reportovány problémy s vyšší tvorbou nápeků na teplosměnných plochách [72–74, 78]. Tomu bylo potřeba přizpůsobit návrh nové experimentální jednotky tak, aby byla schopna vyhodnocovat tvorbu tuhých znečišťujících látek (TZL – částice o velikosti od 0,1 μm po 0,5 mm vznikající například při spalování fosilních paliv a odpadů), tvorbu nápeků a zanášení teplosměnných ploch. Bližší popis této úpravy se nachází v kapitole 4.3, kde navazuje na představení původního stavu experimentální jednotky.

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 (viz Obr. 4). V této Zkušebně je rovněž k dispozici rotační sušárna. Obě tato zařízení byla pořízena v roce 2013. V porovnání s průmyslovými rotačními pecemi a sušárnami, jsou tato zařízení menší. Např. cementárenské pece dosahují délky až 150 metrů. Technologicky se však jedná o zařízení pracující na stejném principu a výsledky spalovacích zkoušek je možné vztáhnout i na větší zdroje. Dle dostupných informací se v Brně nachází ještě jedna další poloprovozní rotační pec. Tato slouží ve Výzkumném ústavu stavebních hmot, a.s.

4.1 Výchozí stav experimentálního zařízení

Zkušební rotační pec (Obr. 4) je z vnitřní strany opatřena žáruvzdornou vyzdívkou. K ohřevu pece slouží plynový automatový hořák PBS APH-MO2PZN o výkonu 220 kW. Kontinuální přívod vsázky zajišťuje šnekový dopravník o příkonu 370 W s průměrem šneku 50 mm. Tento parametr byl zohledňován při objednávkách jednotlivých paliv pro spalovací zkoušky. Pokud dodavatel neměl možnost dodat palivo požadovaných rozměrů, muselo být toto palivo před vstupem do šnekového dopravníku drceno. Odvod popelu je zajištěn gravitačním spádem do nerezové popelnice na druhé straně pece. Sklon pece lze měnit v rozsahu od 0 do 16 °. Rotace pece lze nastavit v rozsahu od 0, 1 do 6 otáček za minutu. Maximální teplota uvnitř pece je přibližně 1200 °C, záleží však na charakteru reakce, která probíhá uvnitř pece. Měření teplot uvnitř pece probíhá pomocí tří bezdrátových termočlánků (TČ) typu K.

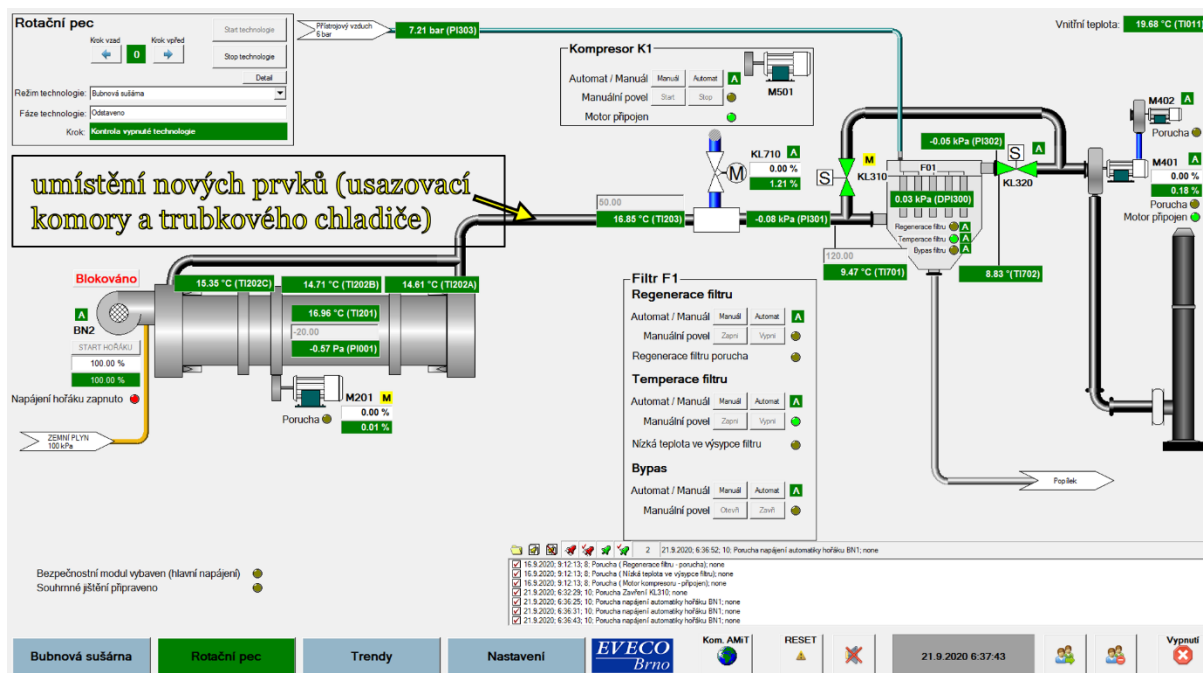


Obr. 4 Popis klíčových částí rotační pece

V peci je udržován podtlak pomocí spalínového ventilátoru RaVent o příkonu 7,5 kW, který je umístěn v exteriéru Zkušebny. Maximální průtok tímto ventilátorem je 0,95 m³/s při hustotě vzduchu 0,57 kg/m³. Před ventilátorem je umístěn rukávcový filtr (vpravo na Obr. 5), který slouží k zachytávání prachových částic (TZL). Spalínová cesta je vybavena přídavným hořákem, který slouží k dohřevu spalin před filtrem. Tím je zamezeno podmínkám, při kterých klesne teplota spalin ve filtru pod teplotu rosného bodu. Systém je ovládaný pomocí laboratorního počítače. Ten zobrazuje a zaznamenává aktuální hodnoty měřených veličin. Grafický výstup počítače je vyveden do monitoru, jehož grafika je patrná z Obr. 6. Zobrazovány jsou základní provozní údaje technologie (podtlak v peci, teplota na výstupu z pece, teplota uvnitř spalovací komory ve třech měřicích bodech, regulace výkonu hořáku, regulace rychlosti rotace pece, tlaková ztráta rukávcového filtru, regulace výkonu spalínového ventilátoru a další). Systém je opatřen kontinuálním záznamem dat. Oklep rukávcového filtru je řízen automaticky na základě jeho tlakové ztráty. Pro pozorování podmínek uvnitř pece slouží průhledítko na protější straně plynového hořáku. Pro případ, kdy je do vsázky zapotřebí dopravit více vzduchu, je pec opatřena přídavným dmychadlem o příkonu 2,2 kW a maximálním průtokem média 318 m³/h. Sklon pece lze upravit pomocí hydraulického zvedáku. V dané poloze (celkem je nosná konstrukce opatřena pěti polohami vymezujícími jednotlivé sklony pece) je pec zajištěna čepem. Změna sklonu pece je možná pouze u odstaveného zařízení. Z bezpečnostních důvodů není změna sklonu pece při jejím provozu možná. Vážení zkušebních vzorků dávkovaného paliva probíhalo na digitální váze CAS NT-200S s třídou přesnosti III. dle evropského schválení T6780.



Obr. 5 Rukávcový filtr sloužící k zachytávání prachových částic ve spalínách



Obr. 6 Grafika řídicího a monitorovacího systému

4.2 Představení již realizovaných pilotních testů na rotační peci Ústavu procesního inženýrství

Od roku 2013, kdy došlo k instalaci poloprovozní rotační pece, proběhlo na tomto zařízení několik zkoušek. Během těchto zkoušek bylo ověřeno, že je tato experimentální jednotka způsobilá pro provádění souvislého experimentálního výzkumu.

V roce 2016 byla provedena zkouška spalování lanolinu a směsi prachu s ovčí vlnou. Při spalování samotného lanolinu se objevily problémy s rozprašováním. Při těchto zkouškách byly měřeny emise NO, CO a SO₂. Při spalování lanolinu při teplotách nad 550 °C se na stěně rotační pece vytvářely tzv. inkrusty, které zabraňovaly

axiálnímu pohybu nově přivedeného paliva. Tento nežádoucí jev je spojen s vysokým obsahem alkalických prvků ve vstupním palivu. Ke kvalitnímu spalování těchto paliv došlo při zapnutí přídavného plynového hořáku s relativně velkým přebytkem vzduchu.

V roce 2017 proběhly zkoušky spalování uhelné suspenze v rotační peci. Během zkoušky byly měřeny emise NO a CO. Během zkoušek bylo zjištěno, že dokonalé spalování v rotační peci není zajištěno při vypnutém přídavném plynovém hořáku, případně pokud je podíl tepla dodaného tímto hořákem nižší než 18 %. Větší průměry trysek byly vyhodnoceny jako vhodnější pro rozprášení uhelné suspenze.

Autor se osobně podílel na realizaci těchto experimentů:

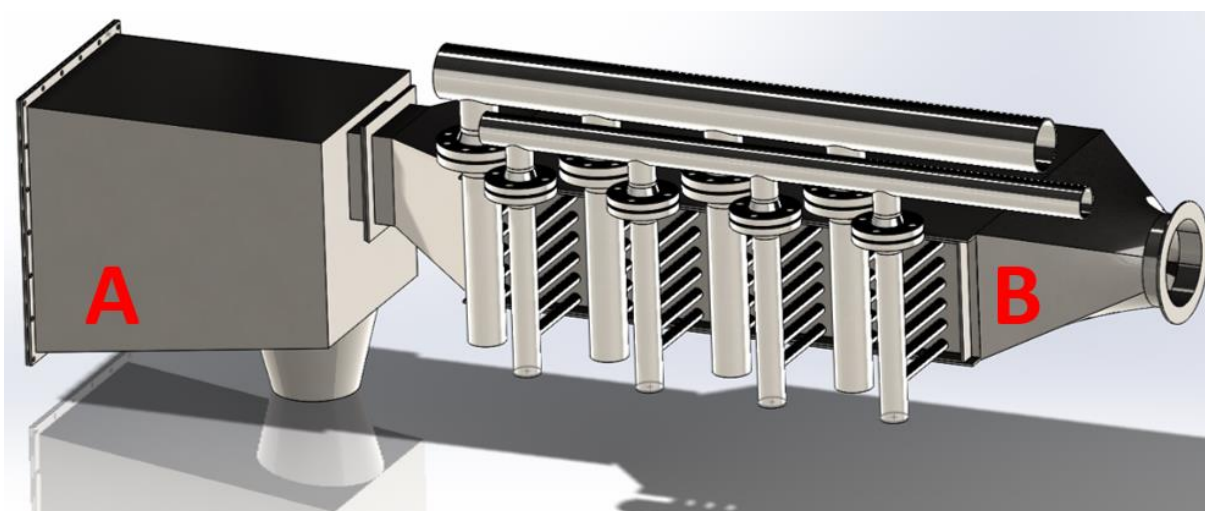
- Spalování kalů v rotační peci probíhá opakovaně od roku 2018. Neupravený kal je nejprve vysušen v rotační sušárně, která se nachází v těsné blízkosti rotační pece. Vysušený materiál je poté spálen v rotační peci. Cílem těchto zkoušek je vyhodnocení možnosti zachycení těžkých kovů do spalin pomocí přimíchání aditiv do neupraveného kalu. Jednoznačný závěr vyhodnocující tuto možnost nebyl prozatím stanoven.
- V roce 2019 proběhla zkouška bělení metakaolinu pro papírenský průmysl. Cílem zkoušky bylo vyhodnocení možnosti dosáhnout vyšší bělosti kaolinu přidáním aditiv do směsi. Ta jsou do směsi přidána ještě před průchodem rotační pecí. Provozní teploty dosahovaly přibližně 700 °C. Tomuto výzkumu se blíže věnuje Centrum materiálového výzkumu Fakulty chemické VUT v Brně.
- Z důvodu absence zkušebního zařízení doposud nebylo měření TZL na rotační peci realizováno. Návrh a umístění odběrových míst stejně jako samotné měření TZL během zkoušek zastřešuje Ing. David Jecha, Ph.D., který se této problematice dlouhodobě věnuje.

Výše zmíněné testy jasně prokázaly způsobilost poloprovozního zařízení k zamýšlené experimentální činnosti. Zkušenosti z těchto testů byly rovněž uplatněny při návrhu usazovací komory a trubkového chladiče a při stanovování metodiky měření zamýšlených experimentů.

4.3 Úprava experimentálního zařízení pro potřeby studia tvorby TZL

Výše zmíněné vybavení bylo k dispozici ještě před zahájením příprav pro tuto dizertační práci. Sloužilo k řešení dalších experimentů a projektových či komerčních aktivit ÚPI. 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 je patrná ze dvou pohledů na Obr. 7 a Obr. 8. Tato komora je označena písmenem A. Přepážku sloužící k zachytávání TZL (její poloha je na Obr. 8 označena žlutou šipkou) lze umístit do 3 poloh. Tyto polohy se liší vzdáleností přepážky od ústí do usazovací komory. Během všech experimentů souvisejících s touto prací byla přepážka umístěna nejdále od ústí do usazovací komory. Vzhledem k vysokým teplotám spalin, které mohou dosahovat až 1000 °C, bylo nutné obě nová zařízení vyrobit ze žárovevné korozi-vzdorné oceli 1.4548. Tato ocel dlouhodobě snáší teploty do 1100 °C.

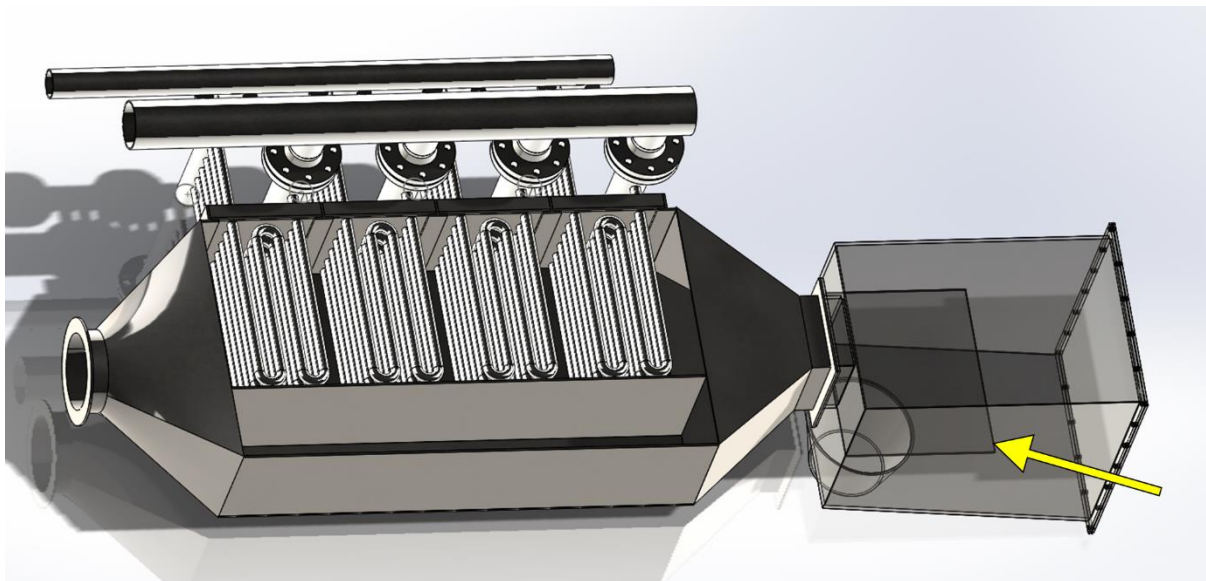


Obr. 7 Konstrukce usazovací komory (A) a trubkového chladiče (B)

Trubkový chladič spalin, který je na Obr. 7 označen písmenem B, se nachází na potrubní trase za usazovací komorou. Konstrukce chladiče je patrná z Obr. 8. Chladič je do spalinové trasy umístěn, aby **simuloval přítomnost reálného zařízení pro výměnu tepla**. Výměníky tepla jsou klíčová zařízení, ve kterých dochází k výměně tepla mezi dvěma proudícími médii. Teplosměnné plochy těchto zařízení jsou ve spalovacích procesech (tedy tam, kde spaliny předávají teplo ohřívanému médiu) zanášeny úsadami ze spalinového popílku (TZL), čímž dochází ke snížení účinnosti přenosu tepla/zvýšení provozních nákladů.

Chladič je navržen s ohledem na jeho účel, tedy vyhodnocení míry zanášení na teplosměnných plochách. Strana vody je rozdělena do čtyř sekcí, které jsou nezávisle na sobě demontovatelné. Tyto sekce jsou navrženy s ohledem na zajištění rovnoměrné distribuce chladicí vody do všech čtyř sekcí. Po demontáži lze jednotlivé sekce snadno očistit a připravit pro další fáze spalovacích zkoušek (viz kapitola 6.9).

Chladič umožňuje souproudé i protiproudé uspořádání průtoků spalin a chladicí vody pro souproudý i protiproudý provoz rotační pece. Pro najíždění a dochlazování pece je chladič opatřen bypassem. Ten může být využit i pro další režimy, kdy není průchod spalin chladičem žádoucí. Chladič je variabilní a výrazně rozšiřuje výzkumný potenciál celého systému.



Obr. 8 Řešení vnitřní konstrukce usazovací komory a trubkového chladiče

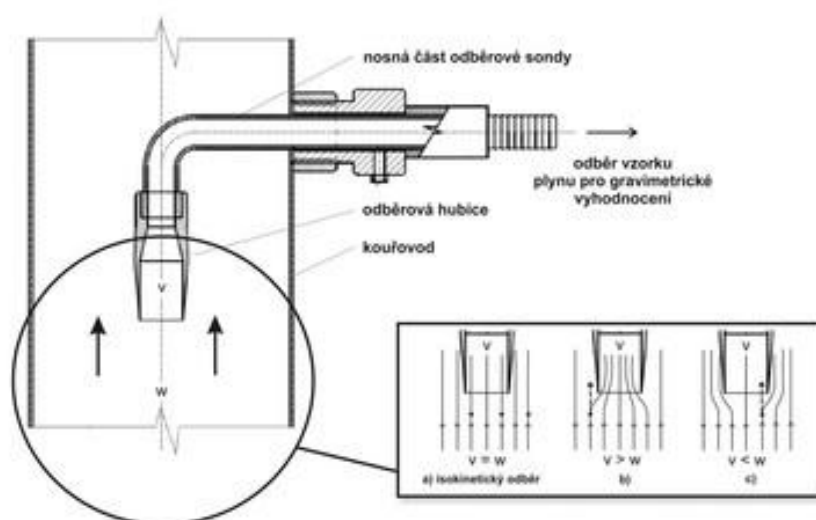
Pro měření teploty spalin je chladič opatřen pěti termočlánky (TČ) ModuTEMP® 70 typu N s měřicím rozsahem -200 až 1300 °C a třídou přesnosti 1 dle ČSN EN 60584-1 ED.2. Ty jsou umístěny na vstupu a výstupu do chladiče a další tři TČ se nachází mezi jednotlivými chladicími sekcemi. Měření teploty chladicí vody je zajištěno pomocí pěti teplotních odporových snímačů TN2435 s měřicím rozsahem -50 až 150 °C a třídou přesnosti A dle DIN EN 60751. Ty jsou umístěny jeden na vstupu do chladiče a další čtyři pak na výstupu z každé sekce. K měření průtoku chladicí vody slouží průtokoměr Sensus HRI. Zařízení umožňuje vyhodnocení tepelného toku pro každou chladicí sekci samostatně.

Vyhodnocení účinnosti zachytávání TZL v usazovací komoře je umožněno pomocí tří inspekčních otvorů. Tyto otvory byly navrženy speciálně pro tato měření. Tyto otvory umožňují připojení aparatury pro měření TZL i dalších sond (viz Obr. 9). Tyto otvory/měřicí body se nacházejí před usazovací komorou, mezi komorou a chladičem a za chladičem (viz Obr. 12). Jejich umístění (s výjimkou měřicího bodu M0) je zvoleno tak, aby bylo dodrženo pravidlo 5 průměrů před a 3 průměrů za měřicím bodem. Toto pravidlo umožňuje dosáhnout homogenního proudění uvnitř potrubí s cílem minimalizace chybového měření. Umístění měřicího bodu M1, který se nachází mezi usazovací komorou a chladičem, je zobrazeno na Obr. 9. Uspořádání měřicích bodů pro měření TZL umožňuje vyhodnocení účinnosti usazování částic TZL v usazovací komoře i určení míry tvorby nálepu na trubkách spalínového chladiče. Spalínová potrubní trasa je dále opatřena dvěma průchodkami G1 pro měření dalších parametrů spalin.



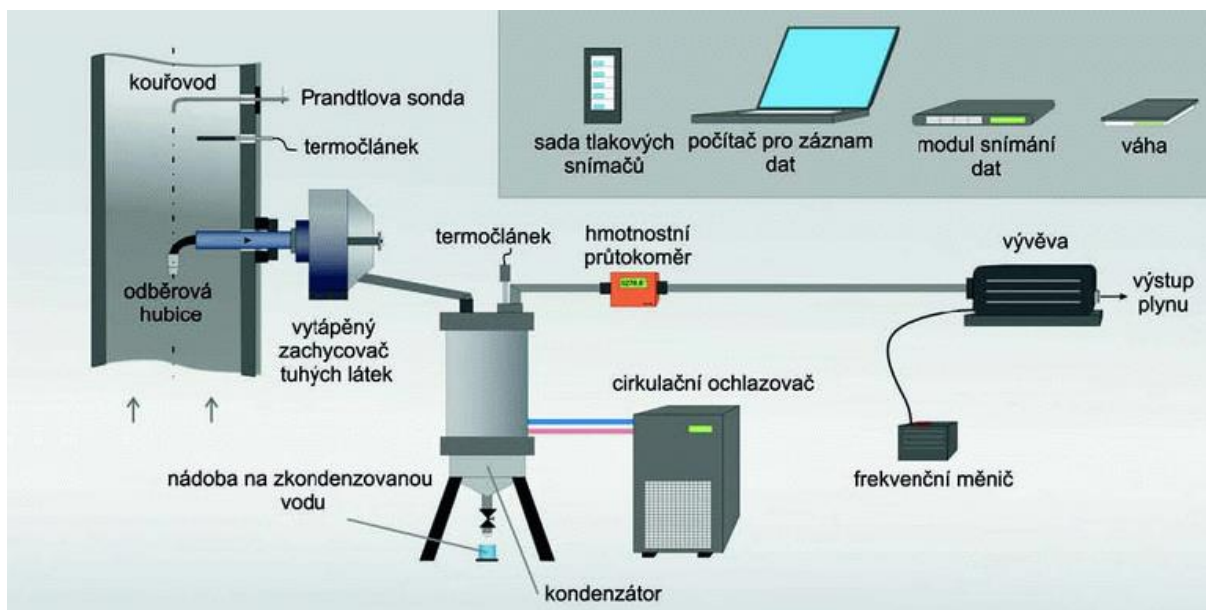
Obr. 9 Umístění druhého měřicího bodu pro stanovení TZL ve spalinách mezi usazovací komorou a trubkovým chladičem

Sběr dat z pěti termočlánků a pěti teplotních odporových snímačů probíhá prostřednictvím data loggeru Graphtec GL220. Toto zařízení disponuje 10 vstupy, které právě postačují na záznam dat z výše zmíněných měřicích zařízení. Vyhodnocení obsahu TZL probíhá na základě gravimetrické metody. Do spalinové cesty je umístěna odběrová sonda (viz Obr. 10).



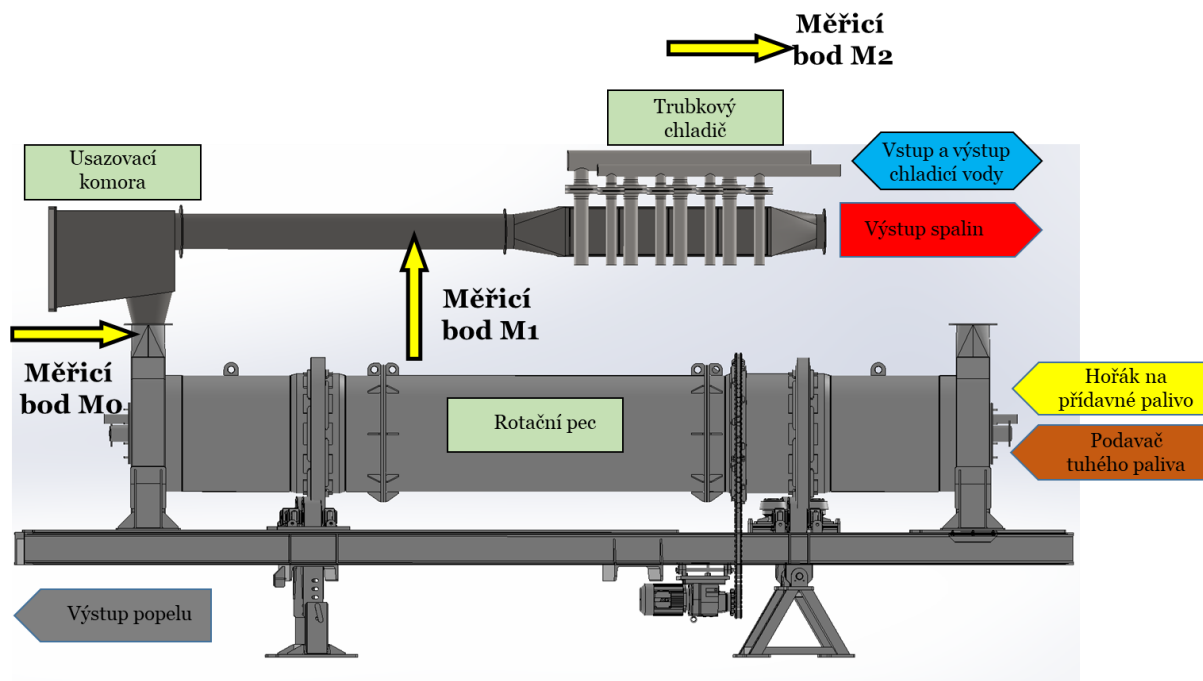
Obr. 10 Odběrová sonda sloužící k vyhodnocení obsahu TZL [79]

Nasávané spaliny procházejí přes filtr, na kterém dochází k zachycení tuhých látek. Spaliny poté pokračují do kondenzátoru, kde dojde ke kondenzaci vody. Dále spaliny proudí hmotnostním průtokoměrem, který měří odebrané množství spalin. Celý měřicí systém je zakončený vývěvou, která zajišťuje průtok spalin celým systémem. Schéma měřicího systému je zobrazeno na Obr. 11.



Obr. 11 Schéma měření TZL ve spalinách [80]

Zařízení bylo v srpnu 2020 instalováno na Zkušebnu a připraveno na úvodní provozní testy. Finální stav celé zkušební technologie je na Obr. 12. Financování usazovací komory, trubkového chladiče, termočláneků pro měření spalin a teplotních odporových snímačů pro měření teploty vody bylo zajištěno prostřednictvím řešeného projektu Národního centra pro energetiku TN1000007. Součástí tohoto projektu jsou mimo jiné i popisované spalovací zkoušky a modelování zanášení teplosměnných ploch tuhými znečišťujícími látkami. Soulad výzkumných a projektových aktivit ÚPI s tématem této dizertační práce pomohl zajistit dostatek finančních prostředků pro úpravu experimentálního zařízení a podepřít výzkumnou činnost z personálního hlediska.



Obr. 12 Schéma zkušební technologie

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 úloze 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 spalování 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 plyných 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:

1. 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.

2. Palivové analýzy

Palivové analýzy proběhly dle norem v laboratořích ÚPI FSI VUT v Brně. Analyzován byl obsah vlhkosti, popelovin a hořlavin. Obsah vlhkosti byl stanoven na základě hmotnostního úbytku. Množství popelovin bylo stanoveno na základě ztráty žiháním při teplotě 550 °C (v případě hnědého uhlí 850 °C). Množství hořlaviny bylo stanoveno jako teoretická hodnota stanovená dopočtem ze znalosti množství vody a popelovin. Hodnota výhřevnosti LHV byla stanovena dle výpočtů spalného tepla vzorků z naměřeného prvkového složení. V rámci prvkové analýzy byl zjištěn obsah uhlíku,

vodíku, dusíku, prchavé síry a kyslíku. Obsah kyslíku byl stanoven výpočtem jako teoretická hodnota.

3. 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.

4. 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. Díky tomu lze dobře identifikovat problematické vlastnosti těchto dvou paliv a jejich směsí. Popis palivových směsí uvádí kapitola 6.2. Složky palivové směsi musejí být pro dosažení maximální míry homogenizace navázeny a vloženy do ocelového barelu (maximálně do poloviny výšky barelu). Barel musí být rotován a překlápěn ve všech osách po dobu alespoň 3 minut.

5. 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.

Pro obsluhu technologie musí být zajištěni alespoň čtyři výzkumní pracovníci. Jeden pro zajištění kontinuálního dávkování tuhého paliva, druhý pro obsluhu aparatury pro měření emisí a dva pracovníci zodpovědní za obsluhu a kontrolu rotační pece a bezpečný průběh experimentu.

Před zahájením experimentů musí být vždy vyvolán nucený oklep rukávcového filtru a vyprázdnění jeho sběrné nádoby, aby bylo možné provést materiálovou bilanci jednotlivých zkoušek. Rotační pec musí být před zahájením dávkování tuhého materiálu přehřáta pomocí plynového hořáku podle výrobcem stanovených najížděcích křivek. Obdobně musí po skončení experimentů dojít i k postupnému ochlazení pece, aby nedošlo k nevratnému poškození vyzdívky pece.

Před zahájením experimentů musí být na všech zařízeních nastaven shodný čas, aby bylo možné propojit experimentální data ze všech měřicích zařízení pro správné vyhodnocení experimentu. Dále musí být provedena kalibrace všech měřidel (termočlánků pro měření teploty spalin a teploty uvnitř rotační pece, teplotních odporových snímačů pro měření chladicí vody, aparatury pro měření plyných emisí a emisí TZL ve spalinách). K relevantnímu vyhodnocení experimentálních dat je nutné zajistit stabilní kontinuální provoz celého zařízení během všech zkoušek. Aby bylo možné specifikovat vhodné směsi alternativních paliv pro uplatnění v průmyslové praxi, je nutné všechny ostatní provozní parametry zachovat beze změny. Jedině takto lze vyhodnotit závislost provozních podmínek na složení tuhého paliva. Jedná se zejména o sklon rotační pece a rychlost její rotace, které mají vliv na zdržnou dobu spalovaného paliva. Dále se jedná o výkon spalínového ventilátoru, který udržuje

stabilní podtlak v peci, plynového hořáku, který mají vliv na průtok a teplotu spalin a na spalovací podmínky uvnitř rotační pece. Rovněž průtok vody trubkovým chladičem je nutné udržovat na konstantní hodnotě. Na základě pilotních testů a dosavadních zkušeností s experimentálním zařízením jsou konkrétní hodnoty těchto parametrů navrženy následovně:

- Sklon pece: 1°
- Rychlost rotace pece: 0,8 – 1,3 rotace za minutu (30 – 50 % na frekvenčním měniči)
- Podtlak v peci: 20 Pa

Přepážka v usazovací komoře musí být v jednotné pozici během všech zkoušek (v tomto případě byla přepážka umístěna nejdále od ústí do usazovací komory). Dávkování tuhého paliva musí být pro všechny zkoušky nastaveno stejně dle tepelného výkonu.

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. Jakmile jsou teploty na začátku, uprostřed a na konci pece stabilní, lze zahájit emisní měření. Časová náročnost těchto experimentů je značná.

Pokud je při skladování lesního odpadu zjištěn pokles vlhkosti, musí být z důvodu porovnatelnosti výsledků palivo vlhčeno na původní hodnotu. Vlhčení musí proběhnout v plastových sudech. Do těchto sudů je vložen lesní odpad a odpovídající množství vody. Na sud je položeno víko. Dvakrát denně dojde k homogenizaci paliva otáčením a překlápěním sudu. Po 5 dnech lze konstatovat, že vlhkost difundovala do materiálu a je dosaženo srovnatelných vlastností, aby bylo možné porovnat výsledky spalovacích zkoušek.

Po dobu všech emisních měření musí být analyzováno přesné množství odebraných spalin. Právě k tomuto množství se vztahují výsledné emise měřených látek. Plynné emise musejí být měřeny kontinuálně, výsledné hodnoty jsou průměrem za alespoň 30minutové měření za stabilních provozních podmínek. Jedná se o emise O₂, CO, NO_x (vyjádřeno jako NO₂), SO_x (vyjádřeno jako SO₂) a TOC (organický uhlík ve spalinách, který indikuje obsah organických zbytků ve spalinách). HCl, HF, NH₃ a Hg ve spalinách jsou absorbovány do kapalného roztoku opět po dobu alespoň 30 minut za stabilních provozních podmínek. Pro omezení chyb měření v důsledky nepředpovídaných dějů a změn při spalovacích zkouškách musí tato emisní měření proběhnout vždy alespoň 3x pro dané palivo nebo palivovou směs. Výsledky této experimentální části jsou uvedeny v kapitole 6.6.

Obdobně jsou měřeny emise TZL ve třech místech spalinové trasy (v bodech M0, M1 a M2). Na základě změny hmotnosti filtru, přes který spaliny procházejí, je určeno množství částic TZL vztažené na jednotku objemu spalin. Emise těžkých kovů v popílku ve spalinách vycházejí z analýzy částic TZL na výše zmíněném filtru. Z laboratorní analýzy těchto filtrů jsou známa množství jednotlivých těžkých kovů. Emisní limity pro těžké kovy ve spalinách jsou rozděleny do 3 skupin. První skupina obsahuje kadmium a thalium, druhá skupina je vyčleněna pro rtuť a třetí skupina je souhrnně vyčleněna pro antimon, arsen, chrom, kobalt, mangan, měď, olovo a vanad. Měření emisí TZL trávající alespoň 30 minut opět musí proběhnout alespoň 3x. Výsledné hodnoty emisní

tvorby jsou průměrem těchto tří hodnot. Příklad protokolu z měření TZL uvádí Tab. 5. Výsledky emisního měření TZL jsou rozděleny do dvou částí. Jedná se o vyhodnocení množství tvorby TZL (kapitola 6.7) a vyhodnocení složení emisí TZL a Hg (kapitola 6.8). Z důvodu propojenosti emisních limitů těžkých kovů v TZL a emisních limitů pro rtuť jsou tyto emise vyhodnoceny souhrnně v jedné kapitole.

Tab. 5 Ukázka protokolu z měření TZL

Znečišťující látka Emisní limit	Tuhé znečišťující látky - TZL - mg m^{-3} vlhký plyn, normální podmínky		
Koncentrace - naměřené vlhký plyn, normální podmínky teplota 0 °C, tlak 101325 Pa	Jednotlivá měření [mg m^{-3}]		
	235,9 ± 6,6	195,0 ± 5,4	210,3 ± 5,9
	Průměrná hodnota [mg m^{-3}]		
	213,7 ± 6,0		
Hmotnostní tok [kg h^{-1}]	4,957 ± 3,913		
Měrná výrobní emise	nestanovena		

Při spalování jakýchkoliv látek platí emisní limity po přepočtu na suché spaliny, normálové podmínky (teplota 0 °C a 101,325 kPa) a referenční obsah kyslíku ve spalinách. Při spalování plyných paliv je dle vyhlášky č. 415/2012 Sb. hodnota referenčního kyslíku 3 %. U kapalných paliv se jedná o hodnotu 6 % a u tuhých paliv 10 %. Aby bylo možné jednotlivé výsledky emisí porovnat, všechny hodnoty emisí musí být přepočteny na suché spaliny, normálové podmínky a jednotný referenční kyslík. V této práci byla zvolena hladina referenčního kyslíku na 6 %. Emisní hodnoty byly vždy přepočteny na mg/mN^3 .

Záznam dat probíhá z velké většiny automaticky pomocí automatického záznamu laboratorního počítače a data loggeru. Průtok zemního plynu, množství prachových částic zachycených na rukávčovém filtru, hmotnostní přírůstek na filtru aparatury pro měření TZL a některé další hodnoty musí být zaznamenány výzkumným pracovníkem na záznamový arch.

K vyhodnocení experimentálních dat musí být použity vhodné metody statistického zpracování dat. Pokud není databáze experimentálně získaných hodnot rozsáhlá, nemusí být použity metody vyššího statistického modelování. **Hlavním výstupem experimentální činnosti jsou graficky vykreslené závislosti emisní tvorby na složení paliva.** Jednotlivé emise naměřené v příslušných bodech spalinové trasy jsou vykresleny do sloupcových grafů. Právě 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 (viz kapitola 6.3). Jedná se o vyhodnocení všech vstupních a výstupních hmotnostních toků. Kompletní rovnice materiálové bilance lze zapsat jako:

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

kde:

$m_{tuhé\ palivo}$ je hmotnostní tok tuhého paliva,

$m_{vzd.}$ je hmotnostní tok vzduchu,

m_{ZP} je hmotnostní tok zemního plynu,

m_{popel} je hmotnostní tok popelu,

$m_{popílek}$ je hmotnostní tok popílku,

$m_{spaliny}$ je hmotnostní tok spalin.

Hmotnostní tok vzduchu v tomto případě zahrnuje nejenom tok vzduchu přes hořák, ale zahrnuje i vzduch přísávaný přes šnek podávacího zařízení, klapku pro přídavný spalovací vzduch a případné netěsnosti rotační pece. Spalovací technologie neumožňuje přesné určení podílů vzduchu proudícího přes hořák a mimo něj. Hořáky na zemní plyn se běžně dimenzují na přebytek spalovacího vzduchu $\alpha = 1.15$, což odpovídá 3 % kyslíku ve spalinách. Budeme-li uvažovat tento předpoklad, ostatní přebytečný kyslík ve spalinách pochází z výše zmíněných částí technologie mimo přídavný hořák na zemní plyn.

Pro vyhodnocení materiálové bilance je využita zjednodušená rovnice zohledňující pouze toky tuhých látek (viz rovnice 2):

$$\dot{m}_{tuhé\ palivo} = \dot{m}_{popel} + \dot{m}_{popílek} \quad (2)$$

Toky popelu (tuhý zbytek odcházející gravitací na dně rotační pece) a popílku (drobné částice popelu odcházející z rotační pece spolu se spalinami) 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. Ta vychází ze zkoušky žiháním dle ČSN EN 15169. Míra nedopalu umožňuje hodnotit kvalitu spalování. Pokud se v popelu či popílku nacházejí nedopálené částice paliva, je to důsledkem nedokonalého spalování a spalovací podmínky musejí být upraveny. U popelu a popílku musí být dále analyzovány hodnoty zastoupení jednotlivých těžkých kovů. Ze znalosti toků těžkých kovů do popelu a popílku lze sestavit jejich celkovou bilanci (viz kapitola 6.3 Tab. 13 - Tab. 15). Z této bilance lze určit tendence jednotlivých těžkých kovů ke koncentraci v popelu či ve spalinách.

Toky těžkých kovů (TK) jsou vyjádřeny absolutně (kapitola 6.3 Tab. 13 a Tab. 14) a relativně (kapitola 6.3 Tab. 15 a Tab. 16). Absolutní vyjádření představuje výsledné hodnoty toku v popelu a popílku konkrétního TK v mg/hod. Naproti tomu relativní vyjádření představuje **tendenci konkrétního TK ke koncentraci v popelu/popílku** jako poměr toku TK v popelu/popílku ku celkovému toku (součet toků v popelu a popílku) TK v %. Jakmile jsou známa jednotlivá procentuální vyjádření závislosti tendence ke koncentraci TK v popelu/popílku na složení tuhého paliva, lze najít průměrnou procentuální hodnotu a určit směrodatnou odchylku tohoto měření (Tab. 15). Tato odchylka vypovídá o tom, zda konkrétní TK má tendenci ke koncentraci do popelu/popílku **bez ohledu na složení tuhého paliva**. Čím je odchylka nižší,

tím má složení tuhého paliva menší vliv na tendenci TK ke koncentraci v popelu/popílku.

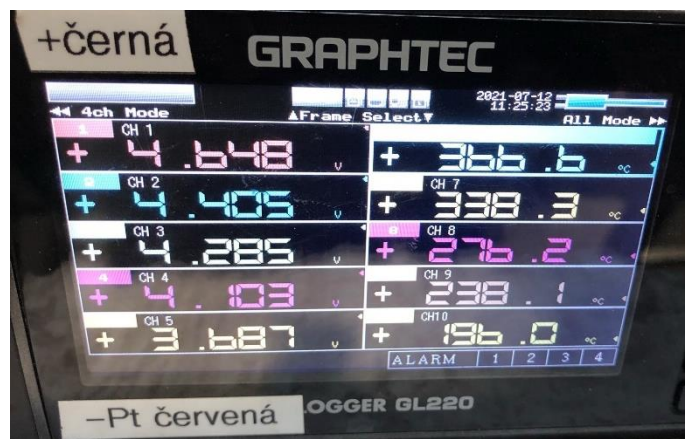
Při analýze Tab. 15 autor práce navrhl logiku této úvahy otočit a sledovat, zda mají u konkrétního paliva všechny TK tendenci ke koncentraci v popelu/popílku (Tab. 16). Čím vyšší/nížší je u tohoto měření průměrná hodnota, tím mají průměrně všechny TK vyšší/nížší tendenci ke koncentraci v popelu/popílku. V předchozím případě, kde je analyzována tendence TK ke koncentraci v popelu/popílku v závislosti na složení tuhého paliva, byla interpretace směrodatné odchylky následující: Čím nižší směrodatná odchylka u konkrétního TK byla zjištěna, tím je jeho tendence ke koncentraci do popelu/popílku méně závislá na složení tuhého paliva. V tomto druhém případě, kdy je analyzována **tendence všech TK obsažených v konkrétním palivu**, je interpretace směrodatné odchylky měření následující: čím je směrodatná odchylka nižší, tím více stejnou mají všechny TK zastoupené v palivu tendenci ke koncentraci do popelu/popílku.

V rámci materiálové bilance je sestavena také měrná produkce popelu v závislosti na spalovaném palivu. Jedná se o množství produkovaného popelu vztaženého na množství dávkovaného paliva. Reálné množství produkovaného popelu je srovnáno s množstvím odhadovaným na základě palivové analýzy (Tab. 12).

Výpočet tepelného zatížení rotační pece (kapitola 6.4) je spolu s výpočtem materiálové bilance základní charakteristikou spalovacího procesu. Výpočet vstupních energetických toků vychází ze znalosti výhřevnosti tuhého paliva a jeho hmotnostního toku, z výhřevnosti přídatného plynného paliva (zemního plynu) a jeho objemového toku.

Energetická bilance spalínového chladiče je zásadní pro zhodnocení účinnosti výměny tepla. Právě zanášení teplosměnných ploch v důsledku usazování částic TZL na teplosměnných plochách je zodpovědné za snížení účinnosti výměny tepla a za zvýšení provozních nákladů v průmyslové praxi. Za účelem posouzení účinnosti přenosu tepla je vypočítána energetická bilance spalínového chladiče. Spaliny vystupující z rotační pece prochází nejprve usazovací komorou a dále pokračují do chladiče spalín. Detailní popis tohoto zařízení se nachází v kapitole 4.3. Chladič umožňuje měření vstupní a výstupní teploty spalín a také teploty spalín mezi jeho sekcemi. Celkem se jedná o pět teplot spalín, které se na Obr. 13 nachází vpravo na kanálech 6 až 10. Ze znalosti objemového průtoku spalín a rozdílu teplot na vstupu a výstupu z horké strany chladiče je určeno teplo odevzdané spalínami. Na základě rozdílu teplot chladicí vody na vstupu a výstupu z chladiče a jejího hmotnostního průtoku lze určit teplo přijaté chladicí vodou. Je předpokládáno, že průtok všemi čtyřmi sekcemi chladiče je shodný. Teplota vody na výstupu z chladiče je aritmetickým průměrem čtyř teplot na výstupech z jednotlivých chladicích sekcí. Účinnost chladiče je dána jako poměr tepla přijatého chladicí vodou a tepla odevzdaného spalínami.

V rámci jedné vícehodinové zkoušky je účinnost výměny tepla v chladiči vypočítána na začátku a na konci spalovací zkoušky. Je předpokládáno, že vlivem zanesení teplosměnných ploch účinnost přenosu tepla klesne. Tento výpočet se nachází na konci kapitoly 6.9.



Obr. 13 Online zobrazení teplot ve spalinovém chladiči

Vyhodnocení tvorby úsad na trubkovém chladiči musí být provedeno až po určité době provozu. Vyhodnocení aktuální míry vytvořených úsad musí proběhnout následovně: Na trubkovém chladiči se změní průchod spalin na bypass (mimo teplosměnné plochy). Po ochlazení všech segmentů chladiče dojde k jejich demontáži a k vyhodnocení tvorby úsad na trubkách chladiče (viz kapitola 6.9).

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 6.10). 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 SO_2 100 mg/m^3 , 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 SO_2 budou 50 mg/m^3 . 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. Vhodným výběrem a definicí fyzikálních a chemických modelů lze nasimulovat pohyb paliva v rotační peci, proces jejich termické přeměny včetně tvorby plyných emisí a TZL. Typické fyzikální nastavení CFD modelu obvykle vyžaduje k řešení nemalé výpočtové nároky (jak z pohledu potřebného hardware, tak z pohledu časové náročnosti).

Výhodami detailního modelování procesu spalování je mimo jiné možnost získat informace o prostorovém rozložení koncentrací produktů spalování. Těmi jsou CO , CO_2 , případně další plyné znečišťující látky jako NO_x , SO_x 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. Modely umí také identifikovat problematická místa, kde dochází k málo kvalitnímu mísení hořlaviny se spalovacím vzduchem. Díky těmto výsledkům lze vhodně upravit geometrii spalovacího zařízení nebo provozní podmínky.

Příkladem modelu spalování tuhých paliv, schopného predikovat např. vznik NO_x , je Shiehnejadhesar et al. (2015), [81]. Jako příklad modelu simulujícího uvolňování TZL v palivovém loži lze uvést Chapela et al. (2018), [82].

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. Zároveň je pomocí numerických modelů možné měnit i provozní podmínky a zkoumat jejich vliv na spalovací proces/tvorbu znečišťujících látek.

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.

Vzhledem k velké množině plynných složek uvolňovaných během hoření tuhého paliva řada autorů volí zjednodušující přístupy modelování [83]. Například se jedná o náhradu komplexních směsí látek několika málo zástupnými látkami, jejichž reakční rychlosti jsou stanovovány empiricky a lze je považovat za spolehlivé pouze pro úzkou množinu paliv. Z tohoto důvodu je nutné výsledky numerických modelů experimentálně validovat.

V případě simulací neustáleného režimu spalování, ke kterému dochází například při najíždění pece, chlazení pece, zvyšování průtoku spalovacího vzduchu nebo snižování výkonu přídavného hořáku na zemní plyn, jsou vyžadovány relativně dlouhé výpočtové simulace. Jedná se řádově o stovky hodin. Tyto modely jsou také velmi náročné na kvalitní a nákladnou výpočtovou kapacitu.

Numerické modelování není obsahem této dizertační práce. Dané problematice se však na Ústavu procesního inženýrství věnuje kolega Ing. Jiří Strouhal. Jedním z příspěvků, ve kterém se autor zabývá zanášením, je provedena citlivostní studie parametrů dvou modelů usazování popílku. Studie je provedena na případu usazovací komory, která je součástí zkušebního zařízení instalovaného na Zkušebně hořáků na ÚPI [84]. Autor v současné době pracuje na své dizertační práci na téma „Modelování zanášení procesních a energetických zařízení tuhými znečišťujícími látkami“, jejíž výstupy úzce souvisí s experimentální částí této předkládané práce.

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.

Zopakujme 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 Spalovaná paliva – dílčí složky palivových mixů

Tato kapitola představuje jednotlivá testovaná paliva. 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. 6.

Tab. 6 Výsledky palivové analýzy dílčích palivových složek

	Hnědé uhlí	TAP 1	TAP 2	KAL 1	KAL 2	Lesní odpad
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 ⁻¹]	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

6.1.1 Hnědé uhlí

Jako výchozí referenční palivo bylo zvoleno standardní a dosud široce využívané hnědé uhlí. Jedná se o tzv. *hruboprach Bílina A/B* viz Obr. 14. Frakce se pohybuje od 0 do 40 mm. Uhlí pochází ze Severočeských dolů a bylo dodáno ve velkoobjemovém vaku Big Bag o nosnosti 800 kg.



Obr. 14 Hnědé uhlí použité jako výchozí referenční palivo

6.1.2 TAP 1 – tříděný plastový komunální odpad s biosložkou

Tuhé alternativní palivo TAP 1 bylo vyrobeno z tříděného komunálního odpadu (ze žlutých popelnic) města Jilemnice. Z důvodu lepší homogenity a snazší manipulace bylo palivo peletizováno. Kvůli nízké soudržnosti částic bylo palivo zpevněno 30 % biosložky (plevy). Peletizace proběhla ve společnosti Družstvo EKOVER na paletizační lince o průměru matrice 8 mm. Délka peletek se pohybuje od 5 do 30 mm viz Obr. 15. Během skladování byla po přibližně 2 týdnech pozorována tenká vrstva plísně na povrchu tohoto paliva.



Obr. 15 Palivo TAP 1 – tříděný plastový komunální odpad s biosložkou

6.1.3 TAP 2 – certifikované palivo ASAPAL

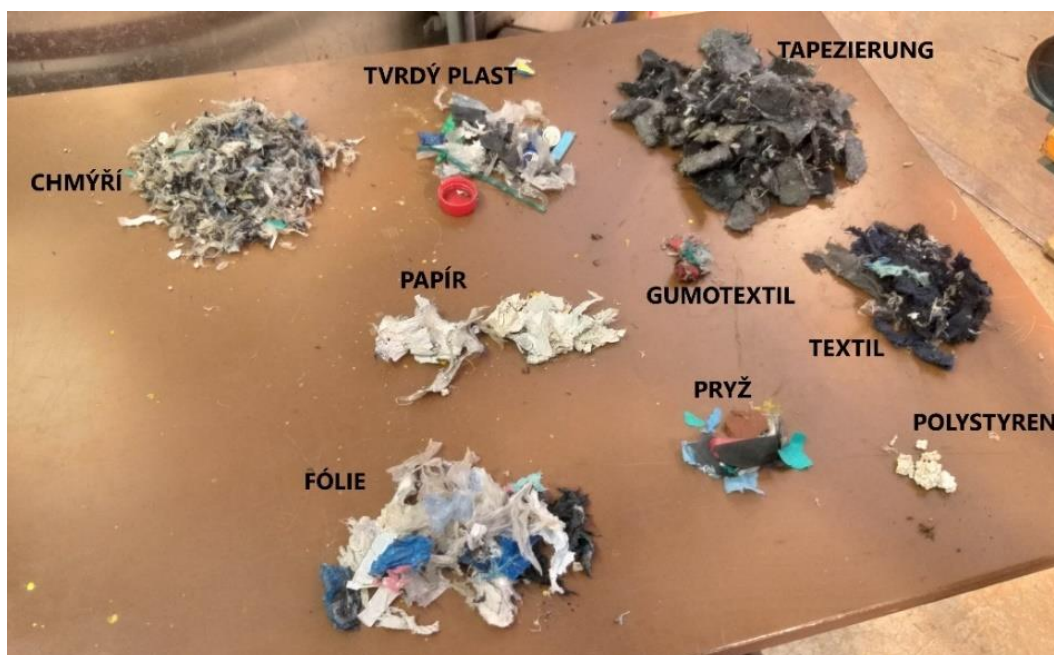
Palivo TAP 2 bylo zakoupeno od společnosti FCC Česká republika, s. r. o., provozovna Brno. Jedná se o palivo z průmyslových odpadů s komerčním názvem ASAPAL, které je certifikováno pro využití v cementárenských pecích. Jeho složení je garantováno a doloženo dodavatelem. Hlavní složkou paliva je tzv. "tapezierung", textilní výplň z automobilové výroby. Složky paliva TAP 2 jsou uvedeny v Tab. 7 a jejich vzhled na Obr. 16 a Obr. 17.

Tab. 7 Frakce ve dvou vzorcích paliva TAP 2 ASAPAL

Frakce ASAPAL	Vzorek 1		Vzorek 2	
	hmotnost [g]	zastoupení [%]	hmotnost [g]	zastoupení [%]
„Tapezierung“	60,0	50,3	101,6	59,5
Tvrký plast	14,6	12,2	23,9	14,0
Chmýří	32,4	27,2	18,7	10,9
Textil	-	0,0	12,0	7,0
Fólie	7,8	6,5	4,9	2,9
Pryž	1,6	1,3	4,4	2,6
Papír	2,2	1,8	4,1	2,4
Polystyren	0,6	0,5	0,1	0,1
Gumotextil	-	0,0	1,1	0,6
CELKEM	119,2	100,0	170,8	100,0



Obr. 16 Jednotlivé frakce paliva TAP 2, vzorek číslo 1



Obr. 17 Jednotlivé frakce paliva TAP 2, vzorek číslo 2

Vzhledem k různorodému charakteru paliva je velmi obtížné provést jakoukoliv fyzikálně-chemickou analýzu tohoto paliva. Aby bylo dosaženo reprodukovatelnosti analýzy za účelem co největší shody výsledků, bylo by nutné analyzovat značné množství paliva a dosáhnout dokonalé homogenity vzorku jeho dokonalým drcením a mícháním. Při interpretaci výsledků palivových analýz je nutné na tento aspekt brát ohled.

Vzhled směsného paliva TAP 2 je patrný z Obr. 18, kde se nachází palivo v podavači rotační pece. Z Tab. 6 vyplývá, že palivo TAP 2 má v porovnání s TAP 1 výrazně nižší vlhkost, přibližně poloviční obsah popelovin a výrazně vyšší výhřevnost. Vzhledem k původu paliva TAP 2 lze rovněž očekávat, že jeho složení bude v průběhu roku více stabilní než složení paliva TAP 1, které se z velké části skládá z proměnlivého

komunálního odpadu, který je navíc doplněn biosložkou. Od dodavatele paliva TAP 2 bylo zjištěno, že obsah chlóru je u tohoto paliva striktně sledován. Právě chlor je zodpovědný za významné provozní problémy spojené s chlorovou korozí. Obsah dusíku je u TAP 2 v porovnání s TAP 1 více než 7x nižší. Lze očekávat, že tento fakt bude mít vliv na tvorbu palivových oxidů dusíku ve spalínách (viz kapitola 6.6). Při interpretaci analýzy vlhkostí je nutné zvážit laboratorní postup. Palivo TAP 2 bylo za účelem dosažení uspokojivé míry homogenizace nejprve drceno, v důsledku čehož došlo k určitému vysušení vzorku, a tedy k poklesu naměřené vlhkosti. Lze předpokládat, že reálná vlhkost paliva TAP 2 vstupujícího do rotační pece byla vyšší.



Obr. 18 Palivo TAP 2 v podavači rotační pece

6.1.4 KAL 1 – zimní

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. Kal prošel mezofilním vyhníváním po dobu 60 dnů při teplotě do 40 °C. Kal byl dále odstředěn, peletizován a sušen po dobu 2 hodin při teplotě 90 °C. Průměr peletek je 3 mm, zatímco jejich délka se pohybuje v rozmezí od 2 do 40 mm. Kal pochází z oblasti s přítomností vysoce minerálních vod, což se projevuje vyšší koncentrací arsenu v tomto palivu. Peletizovaný kal je zobrazen na Obr. 19. U obou testovaných čistírenských kalů byl zaznamenán vysoký obsah dusíku. Hodnoty tohoto prvku v palivu jsou několikanásobně vyšší než u ostatních paliv (v porovnání s lesním odpadem nebo TAP 2 dokonce řádově). U těchto paliv a jejich směsí lze předpokládat zvýšené emise NO_x.

Oba čistírenské kaly mají také zvýšený obsah síry. V lesním odpadu a obou palivech TAP jsou hodnoty zastoupení tohoto prvku téměř nulové. KAL 1 a KAL 2 vykazují trojnásobné hodnoty v porovnání s hnědým uhlím. U těchto paliv a jejich směsí je nutné věnovat zvýšenou pozornost emisím SO_x.



Obr. 19 Palivo KAL 1 v podavači rotační pece

6.1.5 KAL 2 – letní

Jak již bylo řečeno, KAL 2 má stejný původ jako KAL 1. Z palivové analýzy viz Tab. 6 je však patrné, že se složení těchto dvou kalů liší. Vlhkost obou kalů je přibližně stejná. Z důvodu vyššího obsahu hořlavin o více než 6 hm. % je KAL 1 o více než 13 % více výhřevný než KAL 2. To je dáno proměnlivostí složení odpadních vod v průběhu roku. Vizuálně není patrný rozdíl mezi KAL 1 a KAL 2 (Obr. 20). Hodnoty obsahu dusíku v palivu jsou u obou čistírenských kalů vysoké. Dle palivové analýzy je obsah dusíku u KAL 1 ještě vyšší než u KAL 2 o téměř 25 hm. %. V důsledku toho lze předpokládat vyšší tvorbu palivových oxidů dusíku ve spalinách (viz kapitola 6.6).



Obr. 20 Palivo KAL 2 ve velkoobjemovém vaku Big Bag

6.1.6 Lesní odpad

Lesní odpad pochází z lesů z okolí Vlašimi a jedná se o směs čerstvě zpracované dřevní štěpky, kůry, jehličí a rašeliny (Obr. 21). Původ tohoto odpadu je převážně smrkový, lze v něm však najít také obsah jiných dřevin. Tento odpad vzniká při lesní těžbě a obsahuje velké množství vody (přibližně 50 %). Dle dodavatele se jednalo o frakci do 40 mm. Z technologických důvodů však palivo také obsahuje asi 10 % nadsítné frakce do 100 mm.



Obr. 21 Lesní odpad

6.2 Návrh směsí paliv

Jakmile proběhly spalovací zkoušky s dílčími palivy, bylo možné přistoupit k návrhu jejich směsí. Palivové směsi byly definovány na základě dostupnosti paliv na českém trhu, s ohledem na dosavadní provozní zkušenosti a s ohledem na jejich vypovídající schopnost. 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 výše uvedených 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. Důvodem této volby byla snaha zjistit, zda vyšší procentuální zastoupení konkrétní palivové složky povede k vyšší/nížší tvorbě plynných emisí a emisí TZL. Dalším důvodem byla snaha analyzovat vliv míry zastoupení konkrétního alternativního paliva na provozní parametry spalovacího zařízení.

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. 8.

Tab. 8 Složení palivových mixů dle hmotnostních procent dílčích složek paliv

	TAP 1	KAL 1	TAP 2	KAL 2	Lesní odpad
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. 9 se nachází souhrnná palivová analýza všech spalovaných směsí. Jak vyplývá z této tabulky, směsi MIX 1 a 6 mají velmi podobné složení. U směsi MIX 1 palivová analýza neproběhla. Obsah vody, popelovin, výhřevnost atd. byl stanoven pákovým pravidlem na základě hodnot dílčích složek této směsi.

Tab. 9 Výsledky palivové analýzy směsí dílčích složek paliv

	MIX 1*	MIX 2	MIX 3	MIX 4	MIX 5	MIX 6
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 ⁻¹]	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.

Palivová směs MIX 1 (viz Obr. 22) se skládá z 10 hm. % KAL 1, 20 hm. % TAP 1 a 70 hm. % lesního odpadu. Vzhledem k vysokému podílu lesního odpadu není překvapivé, že tato palivová směs obsahuje přes 30 hm. % vody a jen přibližně 5 % popelovin. Výhřevnost směsi dosahuje 11 MJ/kg.



Obr. 22 Palivová směs MIX 1

V porovnání s palivovou směsí MIX 1 se ve směsi MIX 2 (viz Obr. 23) již nenachází lesní odpad. Tato směs se skládá pouze z paliv TAP 2 (90 hm. %) a KAL 1 (10 hm. %). Obsah vody je velmi nízký. Tento parametr je zapotřebí interpretovat s ohledem na úpravu vzorků před laboratorní analýzou viz kapitola 6.1.3. Vzhledem k vysokému

zastoupení paliva TAP 2 je tato směs velmi výhřevná (27,3 MJ/kg je nejvyšší výhřevnost ze všech zkoušených palivových směsí) a obsahuje v porovnání s MIX 3 a 4 malé množství popelovin. U palivových směsí MIX 3 a MIX 4 existuje předpoklad, že u nich bude v porovnání s MIX 2 výhřevnost nižší, zatímco množství popelovin bude vyšší. To je dáno procentuálním zastoupením výhřevného paliva TAP 2, které je u směsí MIX 3 a 4 nižší, zatímco zastoupení paliva KAL 2 s vysokým obsahem popelovin je vyšší.

Směs MIX 3 obsahuje 70 hm. % TAP 2 a 30 hm. % KAL 2. Dle předpokladu je obsah popelovin téměř dvojnásobný v porovnání se směsí MIX 2, výhřevnost směsi MIX 3 je nižší než u MIX 2, což odpovídá původnímu předpokladu. Vzhledově se směs MIX 3 nijak výrazně neliší od MIX 2.



Obr. 23 Palivová směs MIX 2

U směsi MIX 4 (Obr. 24) jsou zastoupení TAP 2 a KAL 2 vyrovnána. V důsledku vyššího množství KAL 2 oproti MIX 3 je u této směsi obsah popelovin vyšší, zatímco množství hořlavín je úměrně nižší. Oproti původnímu předpokladu laboratorní analýza neprokázala, že směs MIX 4 má menší výhřevnost než směs MIX 3. Tento předpoklad vychází z vyššího procentuálního zastoupení méně výhřevného čistírenského kalu. Rozpor výsledků s tímto předpokladem je s největší pravděpodobností způsoben chybou zanesenou do měření v důsledku obtížné homogenizace palivového vzorku pro laboratorní účely.

Spalovací zkoušky směsi MIX 5 (viz Obr. 25) proběhly v rámci stáže zahraničních studentů. Jedná se o směs skládající se z 80 hm. % KAL 2 a 20 hm. % TAP 2. Z důvodu vysokého procentuálního zastoupení KAL 2 obsahuje tato palivová směs vysoký podíl popelovin. V porovnání se směsmi MIX 2–4, které se skládají ze stejných palivových

složek v jiném poměrném zastoupení, obsahuje směs MIX 5 nejvíce vody a má nejnižší výhřevnost.



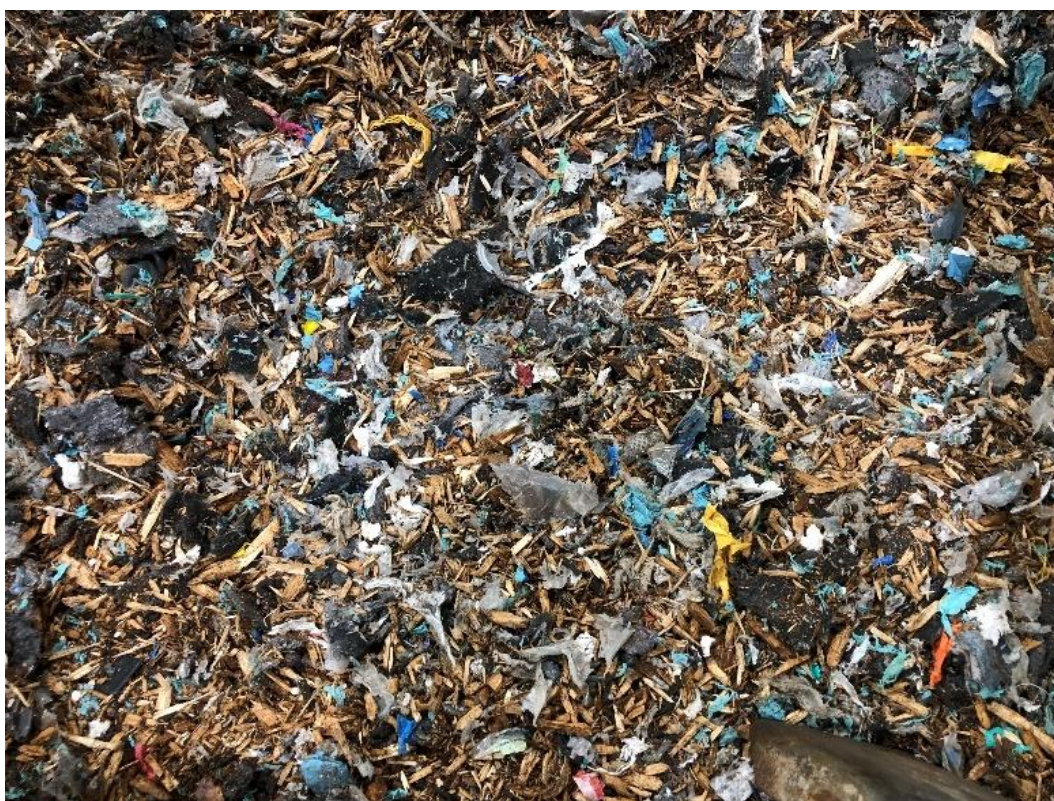
Obr. 24 Palivová směs MIX 4



Obr. 25 Palivová směs MIX 5

Jak již bylo řečeno, palivové směsi MIX 2–5 se skládají ze stejných složek, u kterých se mění pouze jejich hmotnostní zastoupení. Zhodnocení spalovacích zkoušek těchto směsí dává reálnou představu o provozních vlastnostech těchto paliv. S rostoucím množstvím KAL 2 ve směsi roste obsah síry i dusíku. S ohledem na to lze předpokládat, že tvorba oxidů dusíku a oxidů síry bude při spalování této směsi vyšší.

Poslední analyzovaná palivová směs MIX 6 (viz Obr. 26) se skládá ze stejných složek jako směs MIX 1. Liší se však použitím paliva TAP a KAL. Zatímco u směsi MIX 1 bylo použito palivo TAP 1 a KAL 1, u směsi MIX 6 bylo použito palivo TAP 2 a KAL 2. Rozdíly v těchto palivech jsou uvedeny v příslušných kapitolách. Směs MIX 6 se skládá z 10 hm. % KAL 2, 20 hm. % TAP 2 a 70 hm. % lesního odpadu.



Obr. 26 Palivová směs MIX 6

6.3 Materiálová bilance

Pro vyhodnocení materiálové bilance je využita zjednodušená rovnice zohledňující pouze toky tuhých látek (viz rovnice 2). Tabulky Tab. 10 a Tab. 11 uvádějí toky paliva, popelu a popílku v absolutních číslech v kg/hod. Hmotnostní toky se v jednotlivých případech liší, neboť dávkování paliv bylo staveno na základě tepelného výkonu (výhřevnosti paliv jsou různé). Hmotnostní toky popelu a popílku byly měřeny na základě hmotnostního přírůstku pomocí laboratorní váhy.

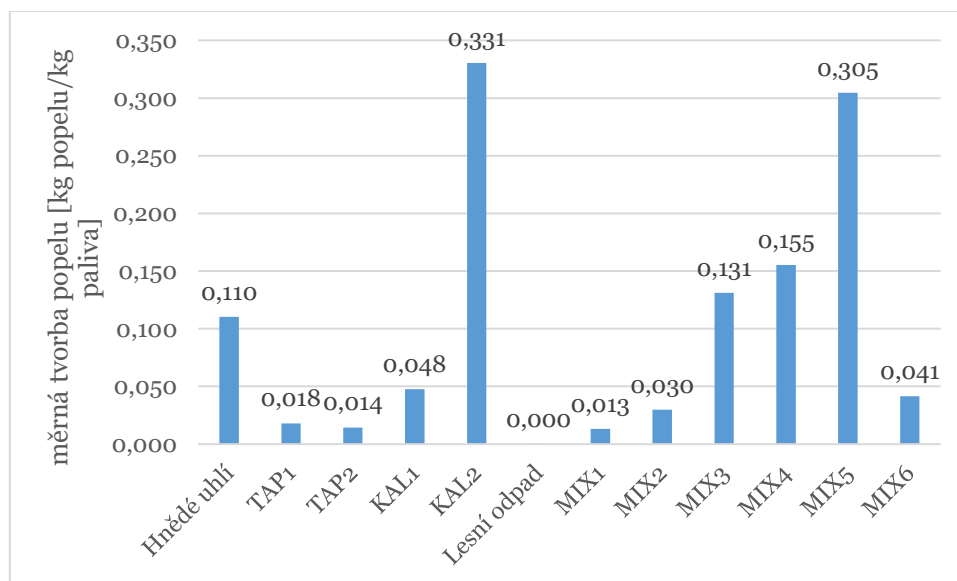
Tab. 10 Hodinové toky tuhých látek při spalování dílčích paliv

Palivo	Tok	Hmotnostní tok [kg/hod]
Hnědé uhlí	Palivo	18,90
	Popel	2,09
	Popílek	0,03
TAP 1	Palivo	24,00
	Popel	0,43
	Popílek	0,17
TAP 2	Palivo	9,75
	Popel	0,14
	Popílek	0,03
KAL 1	Palivo	30,83
	Popel	1,47
	Popílek	0,13
KAL 2	Palivo	19,00
	Popel	6,28
	Popílek	0,08
Lesní odpad	Palivo	30,00
	Popel	-
	Popílek	-

Tab. 11 Hodinové toky tuhých látek při spalování palivových směsí

Palivo	Tok	Hmotnostní tok [kg/hod]
MIX 1	Palivo	17,70
	Popel	0,24
	Popílek	-
MIX 2	Palivo	8,68
	Popel	0,26
	Popílek	0,06
MIX 3	Palivo	9,23
	Popel	1,21
	Popílek	0,09
MIX 4	Palivo	10,43
	Popel	1,62
	Popílek	0,09
MIX 5	Palivo	14,00
	Popel	4,27
	Popílek	0,05
MIX 6	Palivo	15,60
	Popel	0,65
	Popílek	0,08

Z Tab. 10 a Tab. 11 vyplývá, že tvorba popelu je přímo závislá na obsahu popelovin v palivu. Hodnoty popelovin vycházející z palivové analýzy však nejsou zcela totožné (viz Tab. 12) s hodnotami experimentálně zjištěné měrné produkce popelu na Obr. 27, k čemuž by v teoretické rovině mělo dojít. Srovnání v Tab. 12 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 spalinami do rukávcového filtru) a určitou roli hraje i chyba měření zanesená v důsledku tvorby úsad popílku ve spalinových trasách.



Obr. 27 Srovnání měrné tvorby popelu dle paliva

Výrazný nárůst produkce popelu o 136 % (viz Tab. 12) u hnědého uhlí souvisí s jeho nedostatečným dohořením, o kterém dále pojednává kapitola 6.5.2. 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. 12 Srovnání měrné tvorby popelu s výsledky palivové analýzy

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

U většiny spalovacích zkoušek (vyjma směsí MIX 1 a MIX 5) proběhla analýza TK v popelu a ve spalinách. U těchto experimentů jsou vyhodnoceny materiálové toky TK do popelu a do spalin (ve formě plynů i TZL). Sledování obsahu TK v popelu a popílku je nedílnou součástí spalovacích procesů. Jakmile popel nesplňuje legislativní limity těžkých kovů, musí být uložen na skládce nebezpečného odpadu. Nejvyšší toky TK jsou patrné u manganu, mědi, chromu, olova či arsenu. Naproti tomu nejnižší toky jsou zaznamenány u rtuti, thalia či kadmia. Ty se v případě popelu nachází na hranici měřitelnosti, která je u rtuti 0,2 mg/kg_{suš}, kadmia 0,4 mg/kg_{suš} a thalia 0,5 mg/kg_{suš}.

Tab. 13 Vyhodnocení toků těžkých kovů (mg/hod) v popelu a spalinách dílčích palivových složek

	Hnědé uhlí		TAP 1		TAP 2		KAL 1		KAL 2		Lesní odpad	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
As	54,6	10,3	1,0	28,1	1,3	18,5	100,3	294,8	367,4	282,2	~0	2,0
Cd	~0	0,4	~0	4,1	0,2	4,2	~0	7,4	~0	19,0	~0	0,3
Co	24,0	3,8	3,7	5,6	1,9	1,2	22,9	1,6	89,8	1,3	0,1	0,7
Cr	84,3	68,8	26,3	158,0	67,5	54,4	84,2	21,8	295,8	40,5	0,4	41,1
Cu	102,8	24,7	33,0	84,4	131,3	82,2	748,0	28,1	2486,9	28,4	0,6	6,8
Hg	~0	1,5	~0	1,9	~0	3,5	~0	3,9	~0	11,1	~0	0,3
Mn	454,7	43,7	240,1	340,4	66,6	39,4	2508,0	75,3	6154,4	234,8	73,3	164,2
Ni	104,9	39,9	38,0	69,9	72,9	28,6	84,8	7,8	278,8	97,8	0,4	5,4
Pb	3,8	8,7	5,2	54,4	5,3	98,8	34,3	243,8	102,4	395,7	0,0	3,1
Sb	2,0	3,0	7,1	28,5	29,1	95,0	14,4	32,0	48,4	8,5	~0	1,4
Tl	~0	1,5	~0	1,5	~0	5,0	~0	2,3	~0	11,4	~0	1,4
V	117,2	20,1	11,2	13,3	4,7	2,7	99,0	4,3	392,5	2,6	0,1	2,7

*A – tok v popelu v mg/hod; B – tok ve spalinách v mg/hod

Tab. 14 Vyhodnocení toků TK (mg/hod) v popelu a spalínách palivových směsí

	MIX 2		MIX 3		MIX 4		MIX 6	
	A	B	A	B	A	B	A	B
As	5,1	18,8	43,3	9,2	72,3	6,8	27,1	25,4
Cd	0,5	4,5	0,9	1,1	~0	0,8	0,3	1,5
Co	3,4	1,1	15,9	0,8	20,7	0,4	9,3	1,1
Cr	53,0	41,7	99,2	16,9	87,2	19,4	76,8	37,9
Cu	163,0	84,6	533,6	21,4	685,3	7,2	237,6	28,0
Hg	~0	1,1	~0	0,8	~0	0,4	~0	1,5
Mn	172,9	29,7	1057,5	8,8	1438,6	5,7	1 381,8	254,3
Ni	15,0	24,8	68,0	14,2	66,4	4,9	37,1	34,6
Pb	17,2	101,5	111,6	28,0	125,7	13,3	26,1	45,3
Sb	47,3	99,6	78,2	33,3	80,8	12,5	71,7	53,0
Tl	~0	4,9	~0	1,5	~0	1,5	~0	3,7
V	14,0	3,0	81,3	1,9	114,0	1,9	41,0	3,7

*A – tok v popelu v mg/hod; B – tok ve spalínách v mg/hod

Vyjádření toků TK v absolutních číslech v Tab. 13 a Tab. 14 představuje výsledné hodnoty toků v popelu a popílku konkrétního TK v mg/hod. V tomto uspořádání jsou však tyto dvě tabulky poněkud nepřehledné. Nabízí se možnost relativního vyjádření tendence konkrétního TK ke koncentraci v popelu/popílku. Jedná se o poměr toku TK v popelu nebo popílku ku celkovému (popel + popílek) toku TK v %. Na základě jednotlivých (u každého paliva zvláště) procentuálních vyjádření závislosti tendence ke koncentraci TK v popelu/popílku je nalezena průměrná procentuální hodnota a je určena směrodatná odchylka tohoto měření (Tab. 15). Interpretace směrodatné odchylky zní: **Čím nižší směrodatná odchylka u konkrétního TK byla zjištěna, tím je jeho tendence ke koncentraci do popelu/popílku méně závislá na složení tuhého paliva.**

Tuto logiku lze otočit a sledovat, zda mají u konkrétního paliva všechny TK tendenci ke koncentraci v popelu/popílku (Tab. 16). Čím vyšší/nížší je u tohoto měření průměrná hodnota, tím mají průměrně všechny TK vyšší/nížší tendenci ke koncentraci v popelu/popílku. Interpretace směrodatné odchylky zní: **Čím je směrodatná odchylka nižší, tím více stejnou mají všechny TK zastoupené v palivu tendenci ke koncentraci do popelu/popílku.**

Rtuť, která je také těžkým kovem, není vzhledem ke svému charakteru pro tuto analýzu vhodná. Její koncentrace v popelu byla během všech zkoušek naměřena na nulových hodnotách. Tento těžký kov odchází výhradně ve spalínách ve formě plynu. Příslušné hodnoty koncentrací rtuti ve spalínách jsou uvedeny v kapitole 6.8.

Tab. 15 Vyhodnocení tendence těžkých kovů ke koncentraci do popelu či do spalin

tok TK v popelu [%] popel/celek												
	HU	TAP 1	TAP 2	KAL 1	KAL 2	Lesní odpad	MIX 2	MIX 3	MIX 4	MIX 6	Průměr	směrodatná odchylka
As	84	4	7	25	57	0	21	82	91	52	42	0,36
Cd	0	0	4	0	0	0	10	43	0	19	8	0,14
Co	86	40	62	94	99	10	75	95	98	89	75	0,29
Cr	55	14	55	79	88	1	56	85	82	67	58	0,30
Cu	81	28	61	96	99	8	66	96	99	89	72	0,32
Hg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
Mn	91	41	63	97	96	31	85	99	100	84	79	0,25
Ni	72	35	72	92	74	7	38	83	93	52	62	0,28
Pb	30	9	5	12	21	2	14	80	90	37	30	0,31
Sb	39	20	23	31	85	0	32	70	87	57	45	0,29
Tl	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
V	85	46	63	96	99	3	82	98	98	92	76	0,31

Nejprůkaznější jsou výsledky toků u rtuti a thallia. Oba tyto těžké kovy (TK) odešly z rotační pece kompletně (směrodatná odchylka se rovná nule) se spalinami u všech spalovaných paliv. Rovněž kadmium vykazovalo velkou tendenci ke koncentraci ve spalinách (s výjimkou spalování směsi MIX 3 a v menším měřítku i TAP 2, MIX 2 a 6). Naproti tomu prvky kobalt, měď, mangan a vanad se koncentrovaly spíše do popílku. U těchto prvků už však více záleželo na spalovaném palivu. Například vanad měl výraznou tendenci zůstat v popelu, avšak při spalování lesního odpadu téměř všechn tento prvek odešel se spalinami. Podobnou tendenci vykazoval i mangan, měď a kobalt. Tyto čtyři prvky měly tendenci ke koncentraci ve spalinách i při spalování TAP 1.

Nejnižší variabilita toku (popel/spaliny) v závislosti na spalovaném palivu byla zaznamenána u rtuti, thallia a kadmia. Naproti tomu nejvyšší variabilita byla zaznamenána u arsenu. Jinak řečeno, u arsenu má složení paliva největší vliv na to, zda se bude koncentrovat do popelu nebo do spalin. Variabilitou vyjádřenou směrodatnou odchylkou je v tomto případě myšleno, zda má těžký kov tendenci se koncentrovat do popelu či spalin v závislosti na spalovaném palivu. Pokud je variabilita nízká, pak se bez ohledu na spalované palivo ten konkrétní těžký kov koncentruje ve spalinách nebo v popelu.

Zajímavá je také analýza vlivu složení paliva na toky těžkých kovů jako celku (Tab. 16). V této analýze byly záměrně vyloučeny vlivy prvků kadmia, thallia a rtuti, neboť jejich tendence ke koncentraci do spalinového popílku je zřejmá.

Při spalování KAL 2 je patrná vyšší tendence TK ke koncentraci v popelu, což také ovlivnilo tento parametr při spalování směsí MIX 2 – 4. Naproti tomu TK při spalování lesního odpadu mají s malou výjimkou u manganu naprosto zjevnou tendenci se koncentrovat do popílku. U této analýzy je nutné správně interpretovat míru variability pomocí směrodatné odchylky na posledním řádku. V tomto případě je variabilitou vyjádřenou směrodatnou odchylkou myšleno, zda všechny těžké kovy mají při spalování konkrétního paliva tendenci odcházet v popelu či se spalinami. Čím je variabilita nižší, tím je více patrná tendence všech TK ke koncentraci v popelu či popílku.

Tab. 16 Vyhodnocení tendence TK ke koncentraci do popelu či do spalin dle paliva

tok TK v popelu [%] popel/celek										
	HU	TAP 1	TAP 2	KAL 1	KAL 2	Lesní odpad	MIX 2	MIX 3	MIX 4	MIX 6
As	84	4	7	25	57	0	21	82	91	52
Co	86	40	62	94	99	10	75	95	98	89
Cr	55	14	55	79	88	1	56	85	82	67
Cu	81	28	61	96	99	8	66	96	99	89
Mn	91	41	63	97	96	31	85	99	100	84
Ni	72	35	72	92	74	7	38	83	93	52
Pb	30	9	5	12	21	2	14	80	90	37
Sb	39	20	23	31	85	0	32	70	87	57
V	85	46	63	96	99	3	82	98	98	92
průměr	69	26	46	69	80	7	52	88	93	69
směrodatná odchylka	0,22	0,15	0,26	0,35	0,26	0,10	0,27	0,10	0,06	0,21

Analýza tendence koncentrace toků těžkých kovů do popelu či popílku v závislosti na složení tuhého paliva přinesla cenné výsledky. Bylo zjištěno, že zatímco při spalování lesního odpadu těžké kovy odchází v drtivé většině ve formě popílku spolu se spalinami, při spalování KAL 2 a jeho směsí MIX 3 a 4 odchází tyto kovy spíše v popelu. Hlubší analýza této problematiky se nabízí. Pokud je možné na základě složení paliva ovlivnit tok TK, je možné získat čistší popel, který lze využít například v zemědělství.

6.4 Výpočet tepelného zatížení rotační pece

Výpočet vstupních energetických toků je uveden v Tab. 17. Jedná se o energetické toky dodané tuhým palivem a přídatným plynným palivem. Výpočet tepelného výkonu pece vychází z doporučeného tepelného zatížení vztaženého na objem pece v kW/m³. Doporučený maximální tepelný výkon rotační pece je roven hodnotě 200 kW/m³, zatímco doporučený minimální tepelný výkon pece je 100 kW/m³. Jedná se o hodnoty, které byly určeny na základě dlouhodobých provozních zkušeností se spalováním průmyslových odpadů v rotačních pecích [85]. Výpočet objemu poloprovozní rotační

pece využitě pro spalovací zkoušky experimentální části práce uvádí následující rovnice 3:

$$V_{RP} = \frac{\pi \cdot D_{RP}^2}{4} \cdot L_{RP} = \frac{\pi \cdot 0,4^2}{4} \cdot 5 = 0,628 \text{ m}^3 \quad (3)$$

kde:

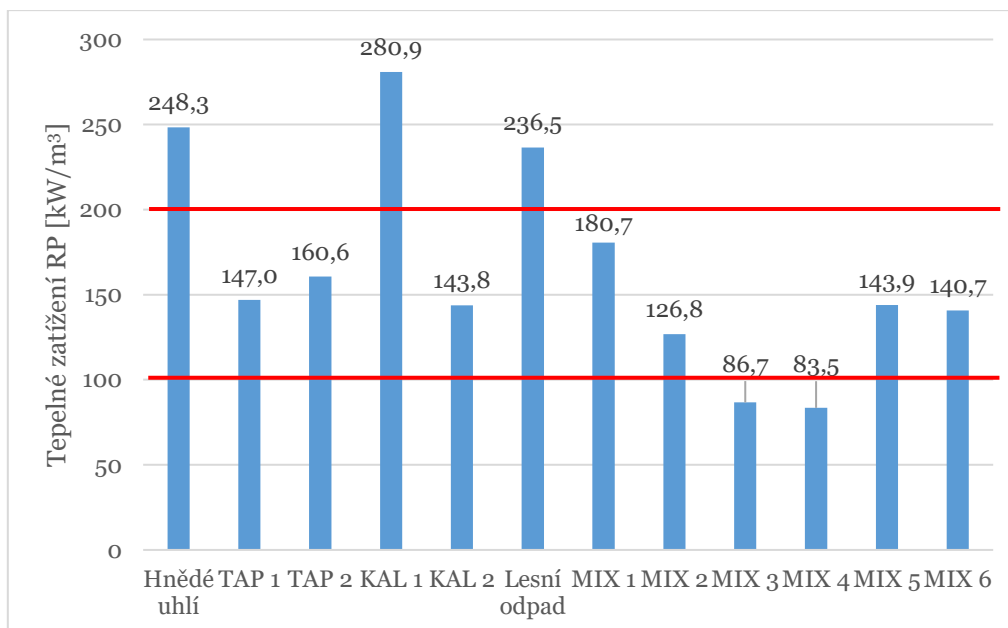
D_{RP} je vnitřní průměr rotační pece,

L_{RP} je délka rotační pece.

Tab. 17 Vstupní energetické toky a tepelné zatížení pece

Palivo	Dávkování	LHV	Výkon kW		Dodané teplo	Odpovídající tepelné zatížení RP
			Palivo	ZP		
	kg/hod	MJ/kg			kW	kW/m ³
Hnědé uhlí	18,0	19,29	96,5	60	156,5	248,3
TAP 1	24,0	13,89	92,6	0	92,6	147,0
TAP 2	9,8	28,12	76,2	25	101,2	160,6
KAL 1	30,8	13,67	117,0	60	177,0	280,9
KAL 2	19,0	12,05	63,6	27	90,6	143,8
Lesní odpad	30,0	9,723	81,0	68	149,0	236,5
MIX 1	17,7	10,95	53,8	60	113,8	180,7
MIX 2	7,3	27,26	54,9	25	79,9	126,8
MIX 3	7,8	25,21	54,6	0	54,6	86,7
MIX 4	7,3	25,94	52,6	0	52,6	83,5
MIX 5	14,0	13,03	50,7	40	90,7	143,9
MIX 6	15,6	14,23	61,64	27	88,6	140,7

Ze znalosti objemu pece vychází poslední sloupec v Tab. 17. Srovnání doporučeného tepelného výkonu pece a jeho reálné naměřené hodnoty zobrazuje Obr. 28. Je zřejmé, že v některých případech doporučený interval tepelných výkonů pece nebyl dodržen. V případě hnědého uhlí je reálná hodnota tepelného výkonu výrazně zkreslená velkou mírou nedopalu v popelu. Reálně téměř 90 % tepla dodaného hnědým uhlím nebylo uvolněno. Vysoká míra nedopalu u tohoto paliva není způsobena nedodržením doporučeného tepelného výkonu pece. Jejím důvodem je velká frakce paliva, případně pro spalování tohoto typu odpadu nevhodný povrch vyzdívky pece. O této problematické blíže pojednává kapitola 7.



Obr. 28 Srovnání doporučeného (pásmo mezi červenými linkami) a reálného tepelného zatížení pece

Vyhodnocení tepelného zatížení rotační pece přineslo zajímavé výsledky. Jedná se například o ověření a potvrzení doporučeného tepelného výkonu pece v rozmezí od 100 do 200 kW/m³. Bylo zjištěno, že jakmile není tento tepelný výkon dodržen, dochází k provozním komplikacím v podobě natavování popelovin nebo například zvýšeného nedopalu v úletovém popílku.

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 (viz kapitola 6.5.3).

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 (viz kapitola 6.5.3).

6.5 Provozní parametry, vyhodnocení provozních poznatků a kvality spalování

Následující kapitola je věnována poznatkům a popisu provozních parametrů ze spalovacích zkoušek. Dále jsou popsány provozní problémy, ke kterým během spalovacích zkoušek došlo a musely být operativně řešeny. V navazujících kapitolách jsou posouzeny výsledky z hlediska volby vhodné palivové směsi a formulována hlavní doporučení pro praxi.

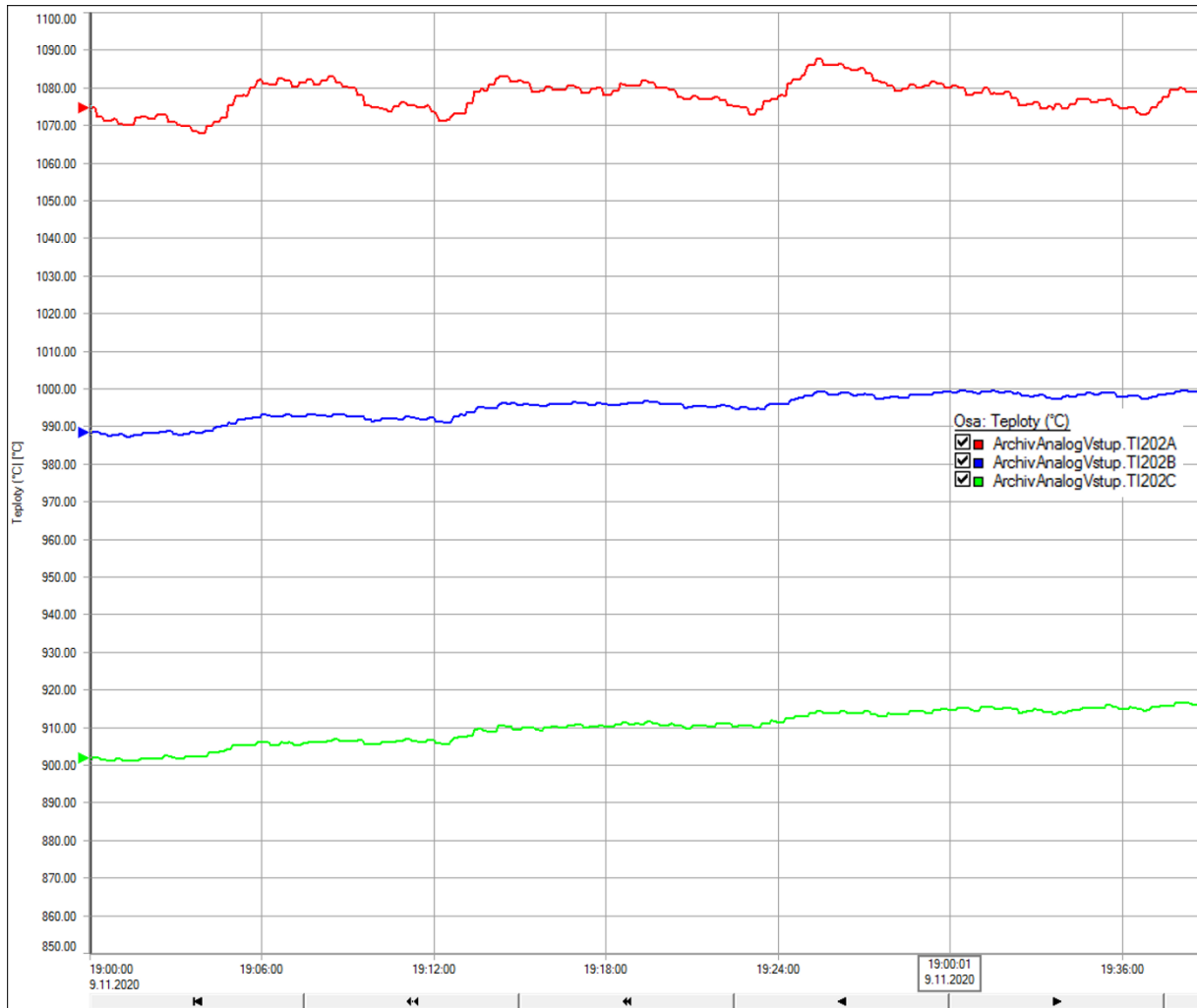
6.5.1 Teploty v rotační peci jako klíčový provozní ukazatel

Provozní teploty uvnitř rotační pece jsou měřeny pomocí bezdrátových termočlánků ve třech místech, jak je uvedeno na Obr. 4. Jedná se o naprosto klíčový ukazatel, na jehož základě operátor řídí spalovací proces. Právě proměnlivost spalovacích teplot rozhoduje o tom, zda bylo dosaženo stabilních spalovacích podmínek. Jakmile operátor vyhodnotí, že jsou teploty v peci ustáleny a provozní podmínky uvnitř pece jsou vhodné, začíná měření emisí a vyhodnocování spalovacího procesu.

Stanovení obecné doporučené teploty pro spalování všech paliv v rotační peci není možné. Vhodné spalovací teploty se odvíjejí od charakteru paliva, jeho vlhkosti, teploty tavení popelovin atp. Obecně lze říct, že by se teploty v první části pece (v následujících grafech se jedná o červenou křivku označující termočlánek TI202A) měly pohybovat od 750 do 1050 °C. Jedná se však pouze o rámcové doporučení, které se může v závislosti na spalovaném palivu lišit.

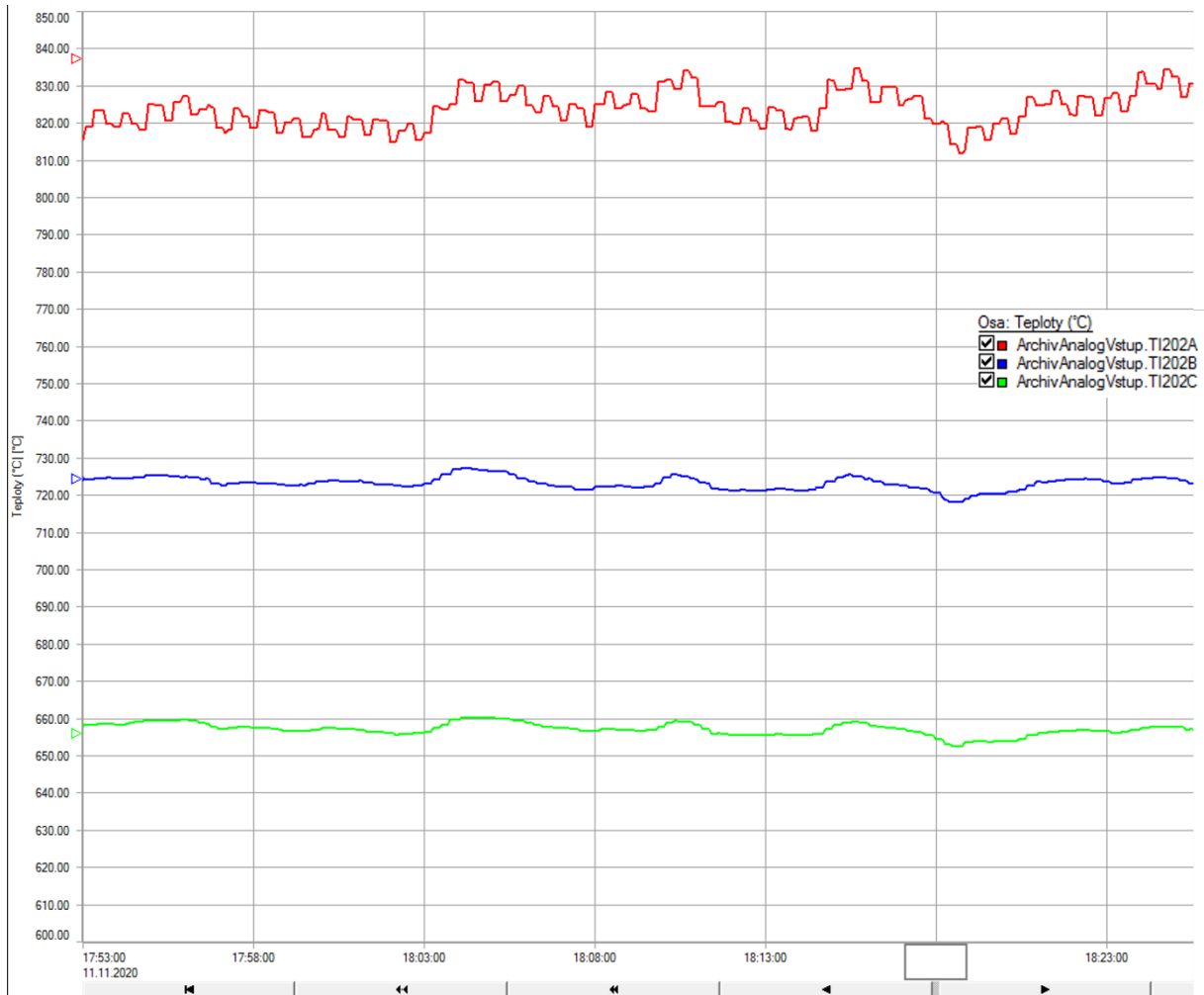
Z důvodu dávkování nehomogenních paliv, paliv s nízkou objemovou hmotností či vysokou vlhkostí mohou teploty v první sekci kolísat. Nejedná se o nijak zásadní problém. Rozhodující je, zda jsou teploty v druhé (modrá křivka TI202B) a ve třetí sekci (zelená křivka TI202C) stabilní. Vysoká variabilita teplot v první sekci byla vlivem klenbování a nehomogenity paliva v podávacím zařízení zaznamenána při spalování TAP 2. Z provozního hlediska i měření emisních hodnot se však nejedná o zásadní problém.

Dávkování hnědého uhlí pomocí šnekového podavače probíhalo nejprve rychlostí 10 kg/hod. Z důvodu nedostatečného vyhoření paliva však docházelo k podchlazení pece, proto bylo navýšeno dávkování na 18 kg/hod, což odpovídá hodnotě tepelného výkonu 96,5 kW. Příkladný hořák na zemní plyn měl po dobu zkoušky výkon 60 kW. Teploty v první části rotační pece (červená křivka) oscilovaly kolem hodnoty 1075 °C, zatímco ve středu pece (modrá křivka) byly přibližně 1000 °C, a na jejím konci (zelená křivka) asi 910 °C viz Obr. 29. Dosažené spalovací podmínky byly stabilní a vyhovující.



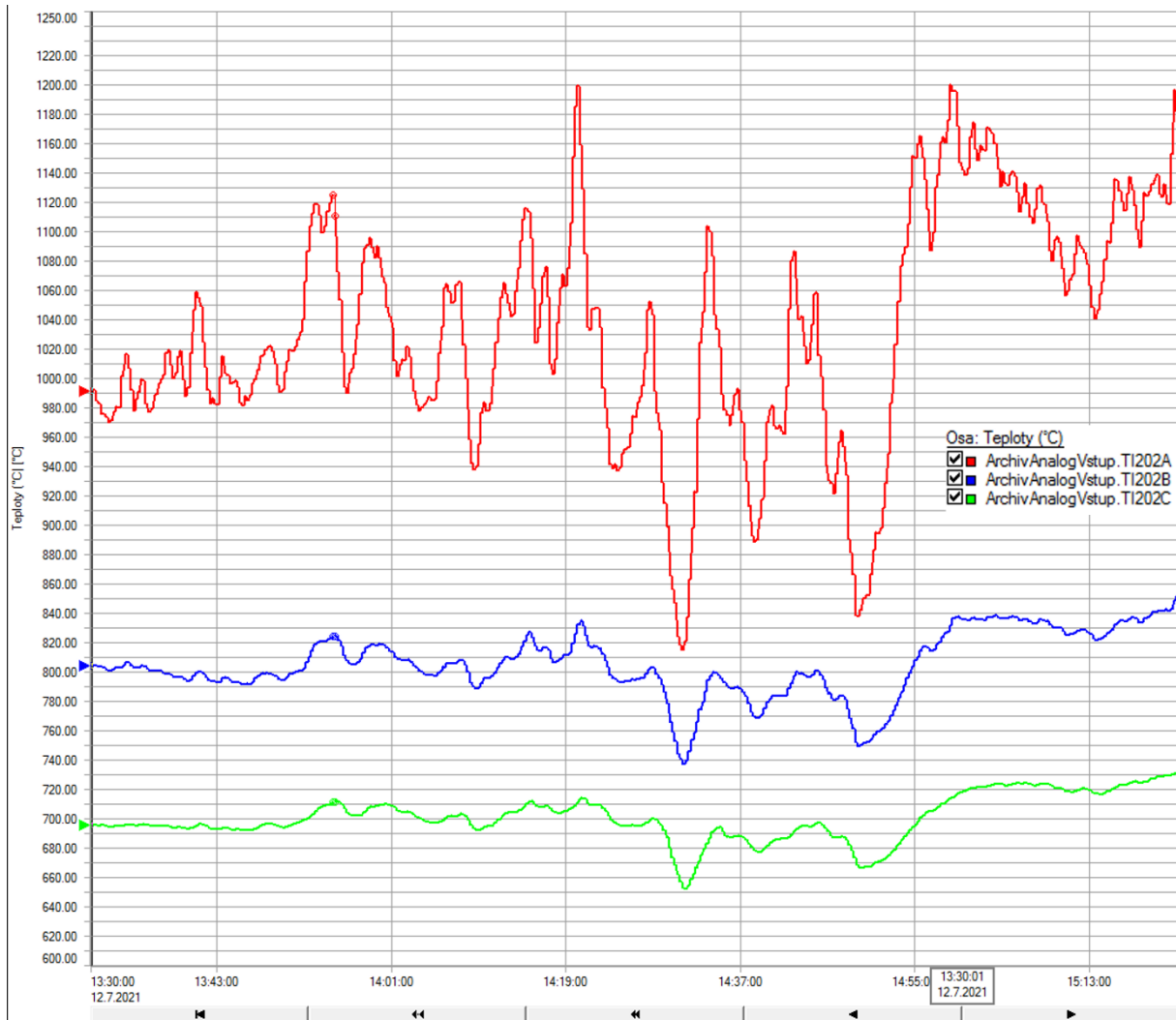
Obr. 29 Teplotní profil při spalování hnědého uhlí

Palivo TAP 1 bylo dávkováno rychlostí 24 kg/hod, což odpovídá tepelnému výkonu přibližně 93 kW. Z důvodu vysokých teplot v první části pece byl po dobu spalovacích zkoušek s tímto palivem přídatný hořák na zemní plyn vypnutý (viz teploty na Obr. 30). Dosažené spalovací podmínky byly stabilní a lze je označit za dobré.



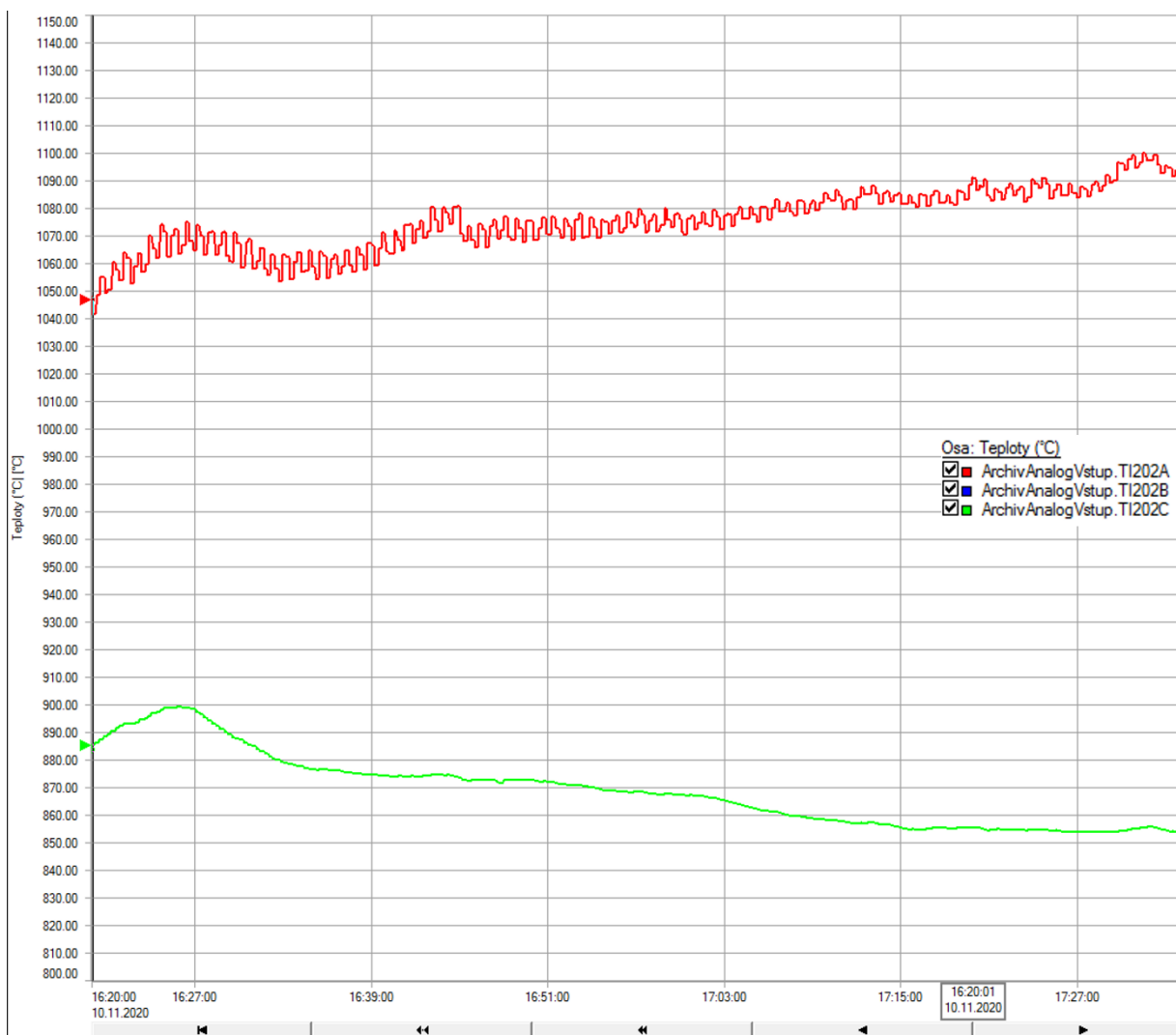
Obr. 30 Teplotní profil při spalování TAP 1

Dávkování paliva TAP 2 probíhalo rychlostí 9,75 kg/hod, což odpovídá tepelnému výkonu 76 kW. Přídavný hořák na zemní plyn měl výkon 25 kW. Toto palivo není homogenní a v násypce podávacího zařízení se klenbovalo, což mělo za důsledek kolísání teploty v první části pece od 900 do 1180 °C (viz Obr. 31). Teploty v druhé a třetí části rotační pece však byly stabilní, a tak mohlo být provedeno emisní měření a vyhodnocení spalovacích zkoušek. Dosažené spalovací podmínky lze označit za vyhovující.



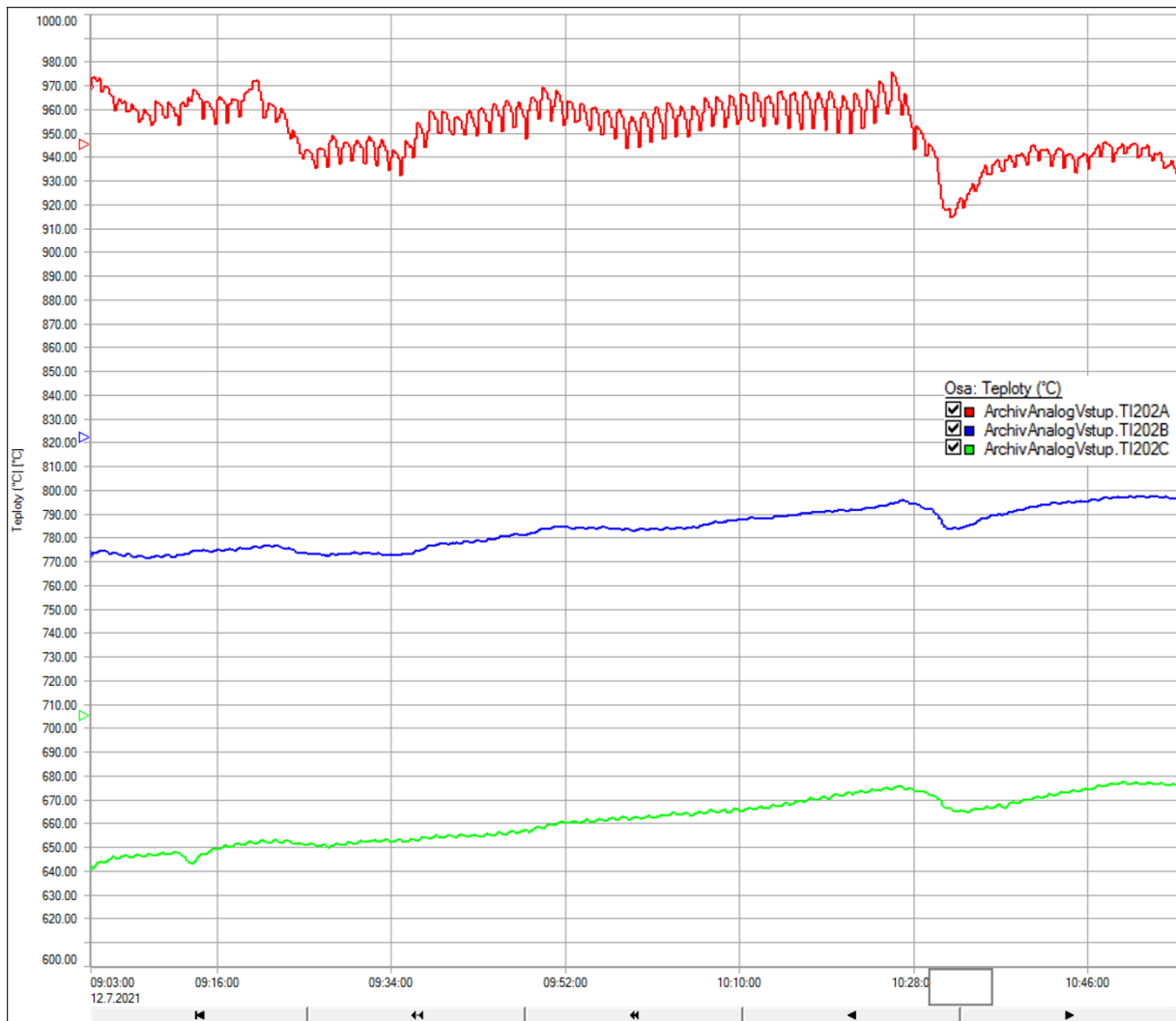
Obr. 31 Teplotní profil při spalování TAP 2

Dávkování peletizovaného KAL 1 probíhalo rychlostí 30,8 kg/hod, což odpovídá tepelnému výkonu 117 kW. Výkon přídavného hořáku na zemní plyn byl 60 kW. Teploty v první části pece se pohybovaly kolem hodnoty 1070 °C (viz Obr. 32), což je pro tento typ paliva příliš vysoká teplota. Výsledkem bylo překročení doporučeného tepelného výkonu pece a výrazné tavení popelu tohoto paliva. Během těchto spalovacích zkoušek došlo k výpadku termočlánku TI202B umístěného uprostřed rotační pece (chybějící modrá křivka). Z hlediska vyhodnocení spalovacích zkoušek se však nejedná o zásadní problém. Jakmile je dosaženo stabilních spalovacích teplot v první a třetí části rotační pece, lze konstatovat, že i teploty v druhé části pece jsou stabilní. V průmyslové praxi se běžně nachází jeden termočlánek/jedno měření teploty na výstupu z rotační pece. Dosažené spalovací podmínky lze označit za stabilní, v tomto režimu však došlo k překročení doporučeného tepelného výkonu pece.



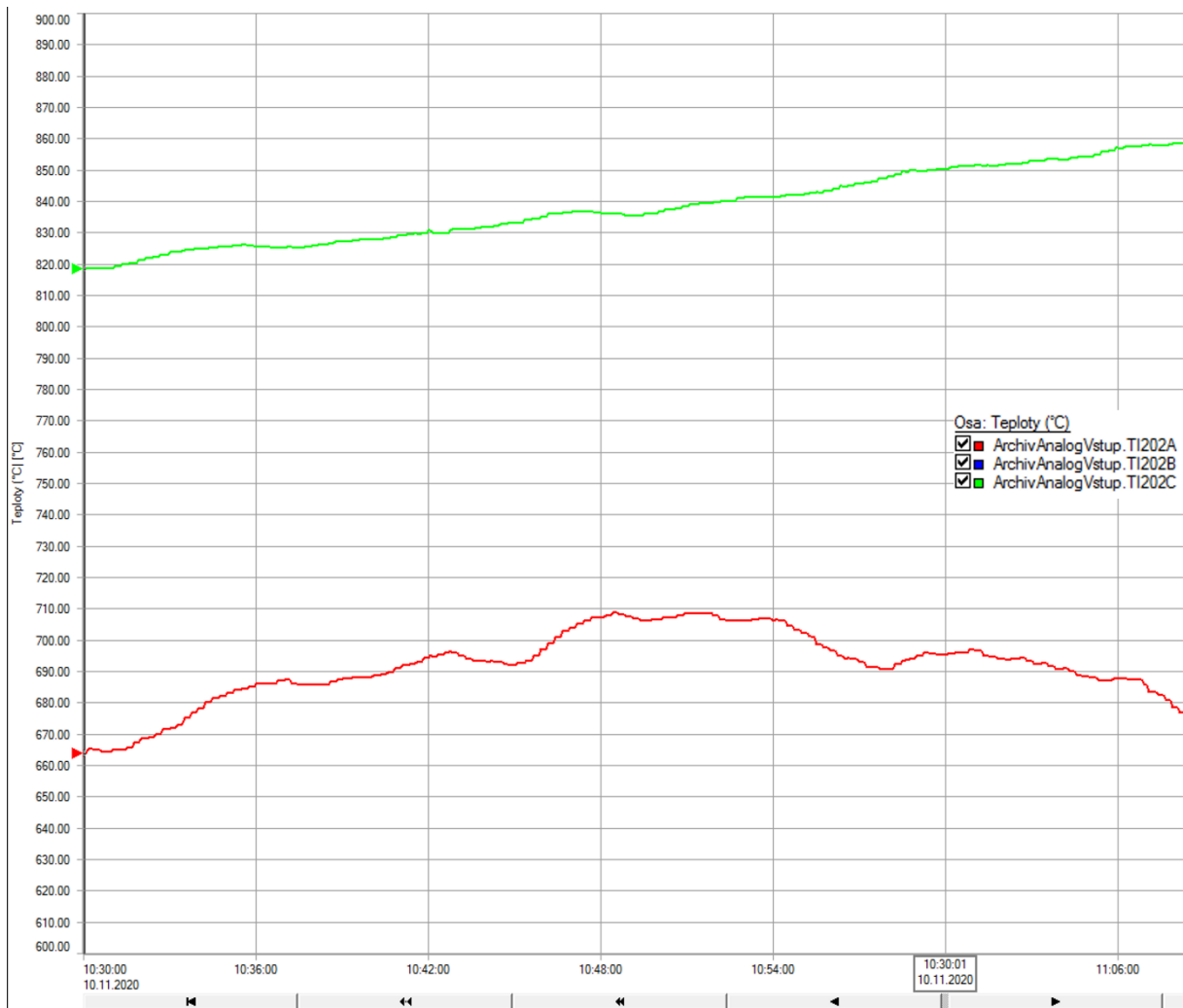
Obr. 32 Teplotní profil při spalování KAL 1

KAL 2 byl dávkován rychlostí 19 kg/hod, což odpovídá tepelnému výkonu 64 kW. Výkon přídatného hořáku na zemní plyn byl 27 kW. Na základě předchozích poznatků se spalováním paliva čistírenského kalu byly teploty v první části pece při spalování KAL 2 udržovány kolem hodnoty 960 °C (viz Obr. 33). Právě tato teplota byla na základě předchozích zkušeností s palivem KAL 1 vyhodnocena jako vhodná. Při těchto provozních podmínkách dochází k dohoření paliva a zároveň nedochází k provozním problémům v důsledku natavování popelu na stěny pece či vzniku aglomerátů v popelu. Dosažené spalovací podmínky lze označit za stabilní a velmi dobré.



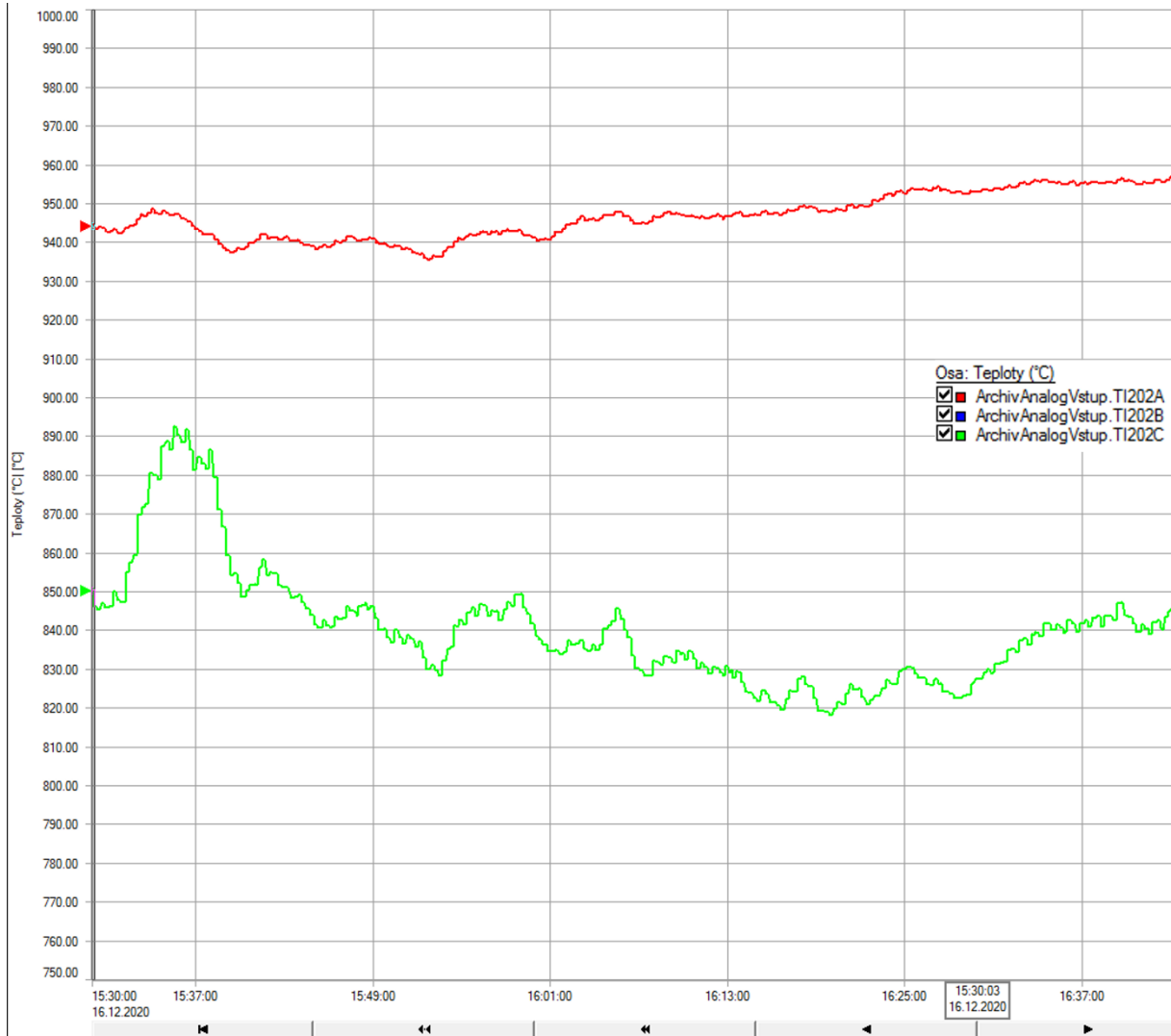
Obr. 33 Teplotní profil při spalování KAL 2

Lesní odpad byl dávkován rychlostí 30 kg/hod, což odpovídá tepelnému výkonu 81 kW. Přídavný hořák na zemní plyn měl výkon 68 kW. Z důvodu zvýšené vlhkosti paliva byly teploty v první části pece v porovnání s ostatními palivy nižší a pohybovaly se kolem hodnoty 700 °C (viz Obr. 34). Z provozního hlediska není tento jev nijak problematický. Palivo nehořelo intenzivně pouze u čela pece, ale uvolňovalo teplo po větší délce rotační pece. Rovnoměrné tepelné zatížení pece je z hlediska její životnosti žádoucí. Během těchto spalovacích zkoušek došlo k výpadku termočlánku TI202B umístěného uprostřed rotační pece (chybějící modrá křivka). Spalovací podmínky lze označit za dobré.



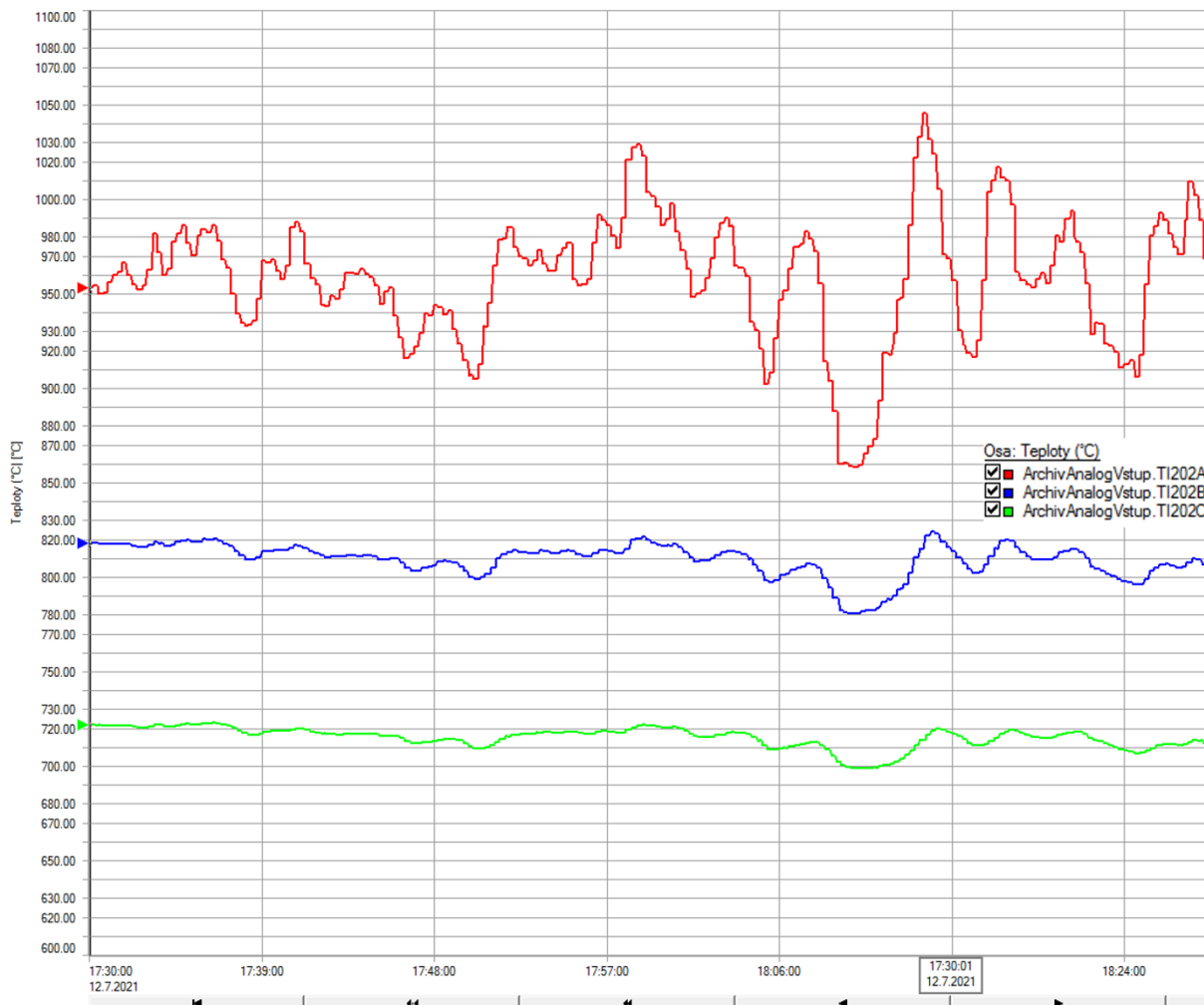
Obr. 34 Teplotní profil při spalování lesního odpadu

Dávkování palivové směsi MIX 1 probíhalo rychlostí 17,7 kg/hod, což odpovídá tepelnému výkonu přibližně 54 kW. Přídavný hořák na zemní plyn měl výkon 60 kW. Teplota v první části pece se pohybovala kolem hodnoty 950 °C (viz Obr. 35). Během těchto spalovacích zkoušek došlo k výpadku termočlánku TI202B umístěného uprostřed rotační pece (chybějící modrá křivka). Spalovací podmínky lze označit za stabilní a dobré.



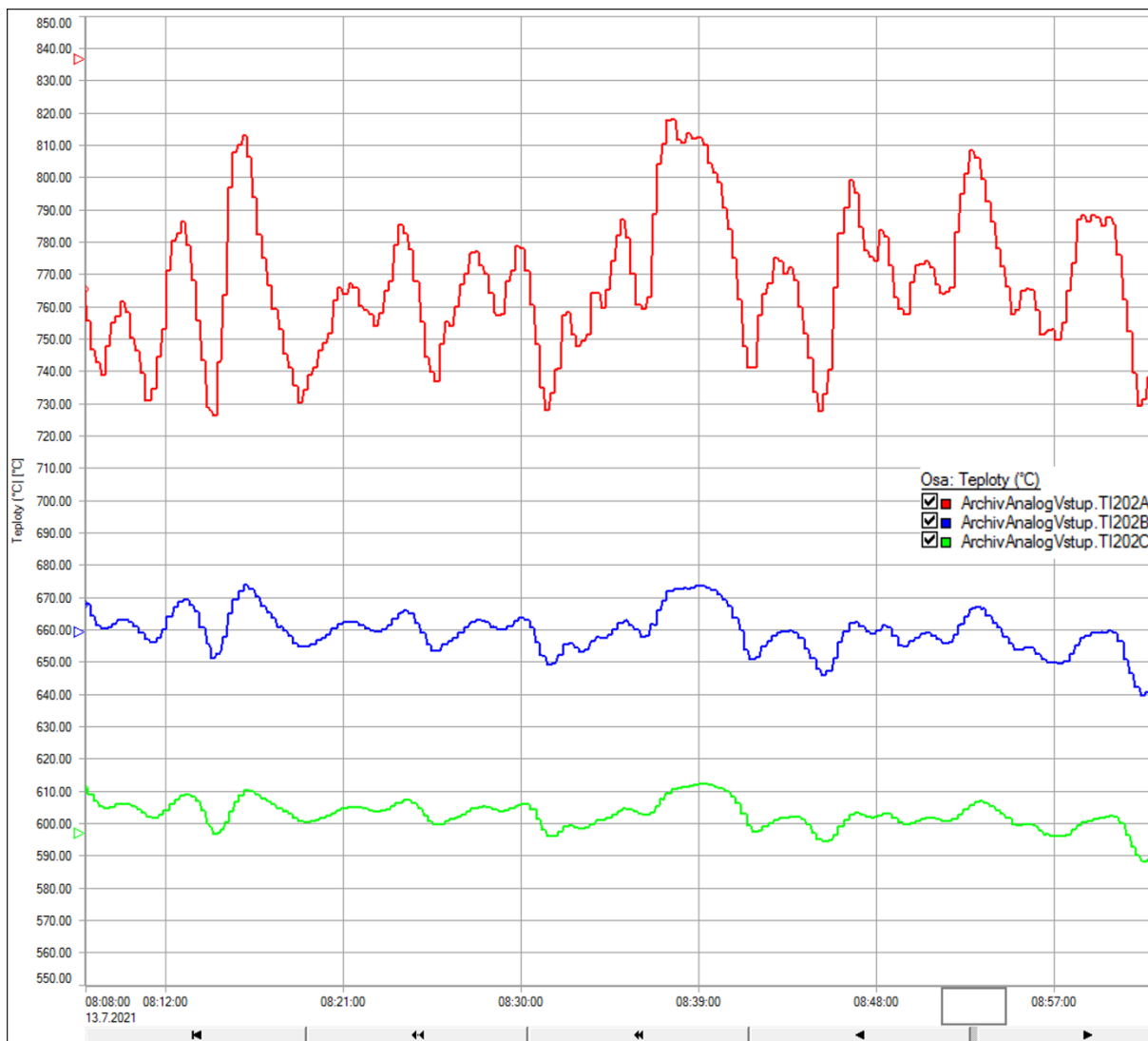
Obr. 35 Teplotní profil při spalování MIX 1

Dávkování směsi MIX 2 (90 hm. % TAP 2 a 10 hm. % KAL 2) probíhalo rychlostí 7,25 kg/hod (55 kW tepelného výkonu) za pomoci 25 kW na přídatném hořáku na zemní plyn. Při této rychlosti dávkování byly teploty v první části pece z důvodu nehomogenity a klenbování TAP 2 proměnlivé a kolísaly kolem hodnoty 970 °C (viz Obr. 36). Teplot ve druhé a třetí sekci byly stabilní. Spalovací podmínky lze označit za dobré.



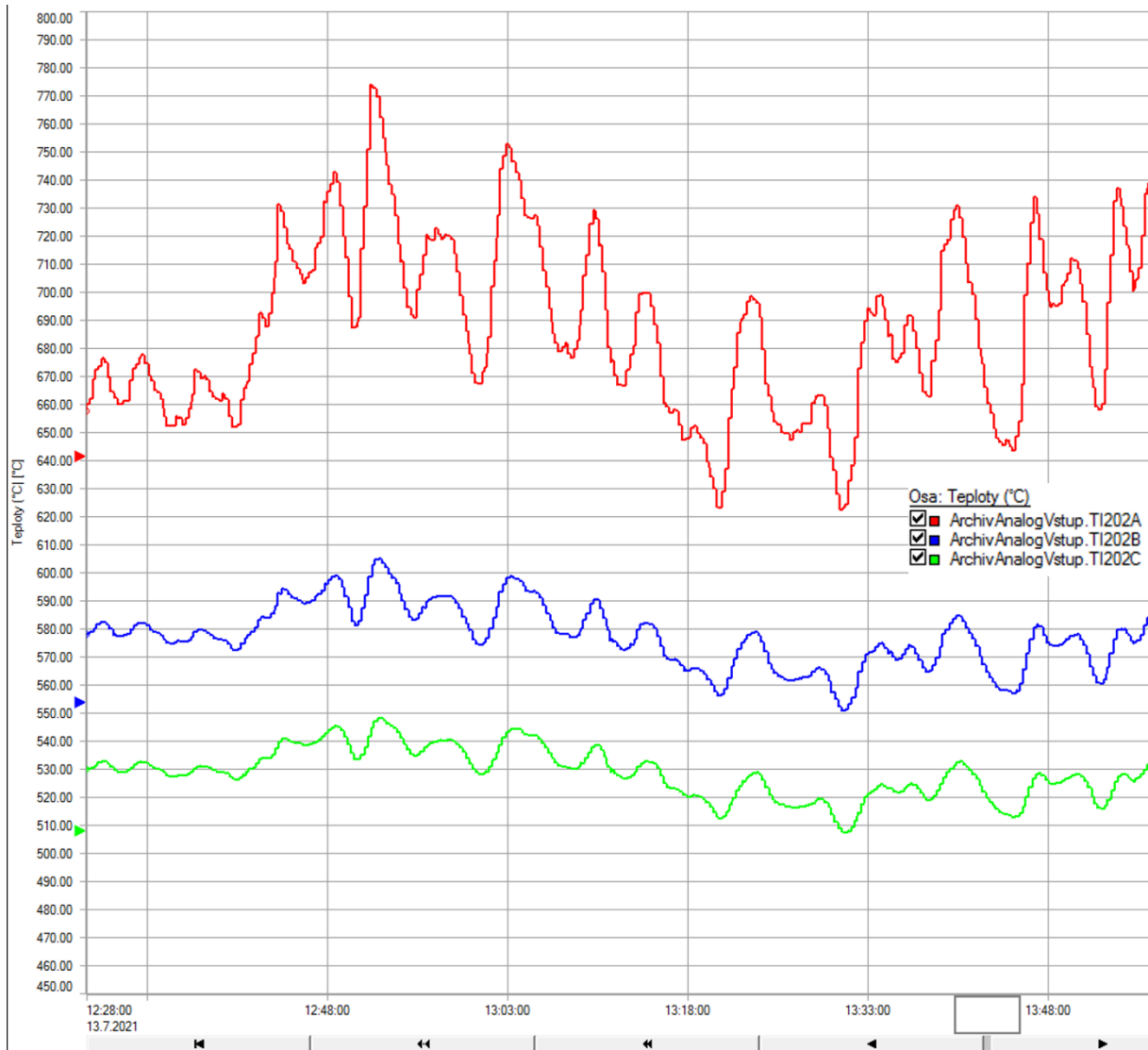
Obr. 36 Teplotní profil při spalování MIX 2

Po spalovací zkoušce se směsí MIX 2 následovala zkouška s MIX 3 (70 hm. % TAP 2 a 30 hm. % KAL 2). Tato palivová směs byla dávkována rychlostí 7,8 kg/hod (cca 55 kW tepelných). Při spalování této směsi došlo při provozu přídavného hořáku k nárůstu teplot v první sekci pece přes 1100 °C a došlo k tvorbě nežádoucích nápeků na stěny rotační pece. Aby bylo zabráněno další tvorbě těchto nápeků, došlo k vypnutí přídavného hořáku na zemní plyn. Vypnutí tohoto hořáku vedlo k výraznému snížení spalovacích teplot. Ty byly opět v první části pece vlivem přítomnosti TAP 2 nestabilní a se pohybovaly od 730 do 810 °C (viz Obr. 37). Ve druhé a třetí sekci pece byly teploty stabilní na hodnotě přibližně 610 a 660 °C. V tomto režimu byla rotační pec mírně podchlazená.



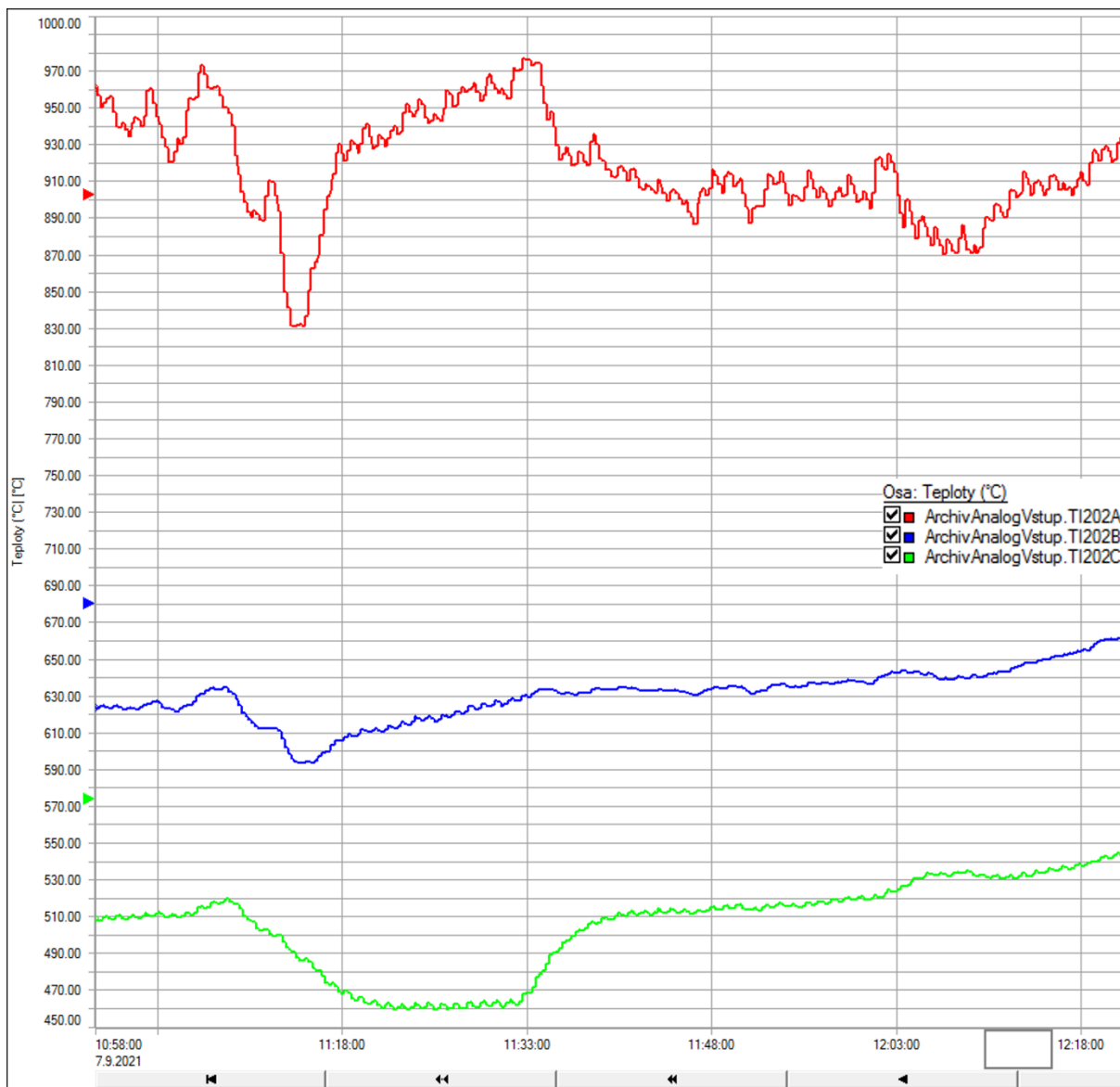
Obr. 37 Teplotní profil při spalování MIX 3

Spalovací zkouška s MIX 4 probíhala obdobně jako se směsí MIX 3. Rychlost dávkování byla 7,3 kg/hod (odpovídá tepelnému výkonu necelých 53 kW). Tyto zkoušky z provozních důvodů stejně jako v případě směsi MIX 3 probíhaly bez přídavného hořáku na zemní plyn. Teploty v první sekci rotační pece byly nestabilní a pohybovaly se mezi 650 a 740 °C (viz Obr. 38). Teploty v druhé a třetí části pece lze označit za relativně stabilní na hodnotách 525 a 580 °C. V tomto režimu byla rotační pec mírně podchlazená.



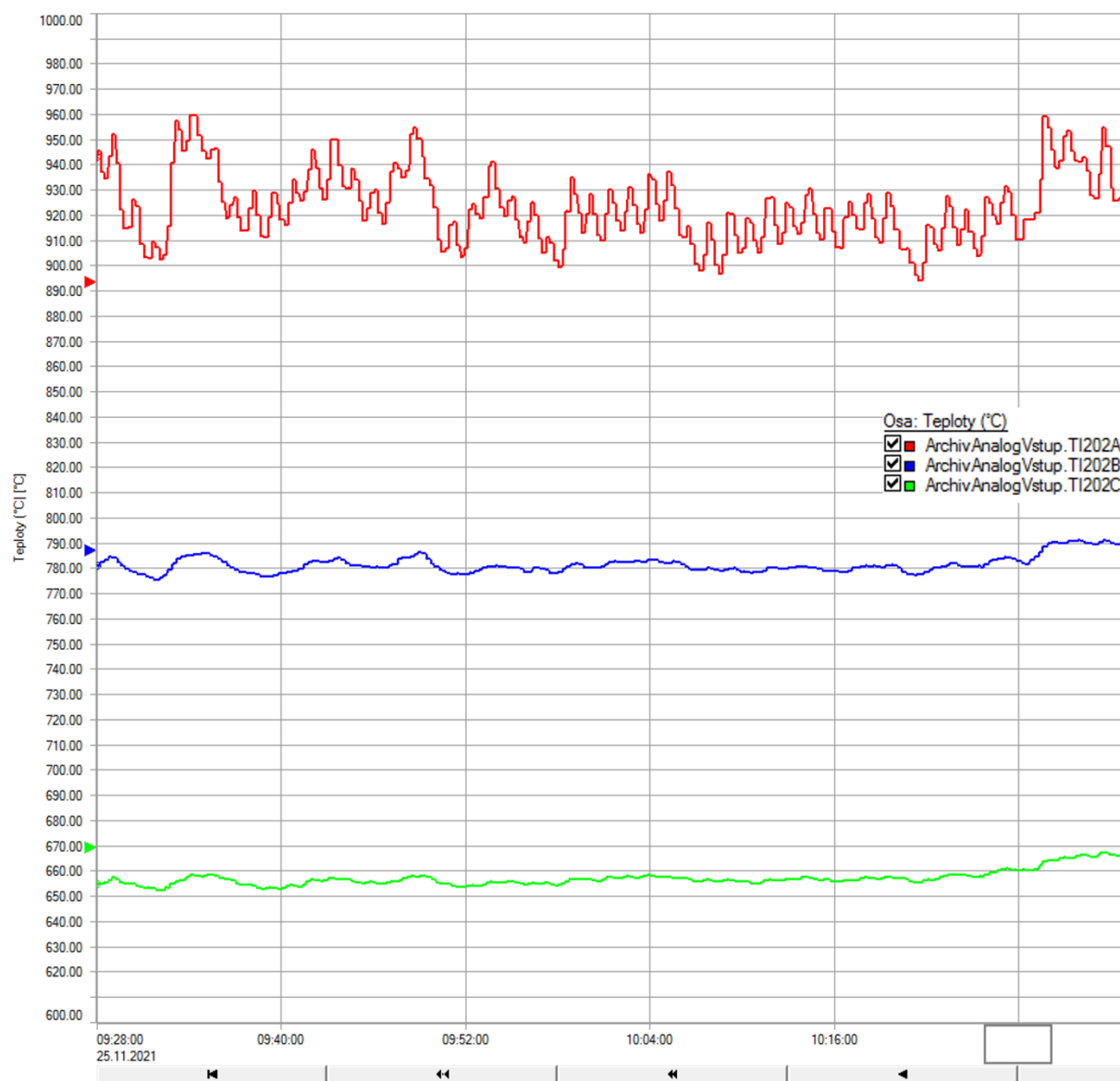
Obr. 38 Teplotní profil při spalování MIX 4

Rychlost dávkování při spalovací zkoušce s MIX 5 byla 14 kg/hod (50,7 kW tepelných). Výkon přidavného hořáku na zemní plyn byl nastaven na 40 kW. Teploty v první sekci pece oscilovaly kolem hodnoty 900 °C (viz Obr. 39). V tomto režimu byly spalovací podmínky stabilní a vhodné.



Obr. 39 Teplotní profil při spalování MIX 5

Poslední testovanou palivovou směsí byl MIX 6. Jednalo se o směs poměrově shodnou se směsí MIX 1 (10 hm. % kal, 20 hm. % TAP a 70 hm. % lesního odpadu) s tím rozdílem, že u MIX 6 byl použit KAL 2 a TAP 2. Lesní odpad byl navlhčen tak, aby bylo dosaženo stejné vstupní vlhkosti jako u směsi MIX 1. Spalovací zkoušky proběhly s použitím přídavného hořáku na zemní plyn o výkonu 27 kW. Palivo bylo dávkováno rychlostí 15,6 kg/hod, což odpovídá tepelnému příkonu necelých 62 kW. Teploty se pohybovaly na hodnotách přibližně 920 °C ve vstupní části pece a na hodnotě přibližně 690 °C ve výstupní části pece (viz Obr. 40). Dosažené spalovací podmínky jsou velmi dobré.



Obr. 40 Teplotní profil při spalování MIX 6

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.

6.5.2 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 pecí spáleny. Vlhkost v popelu lze předpokládat nulovou. Nenulové, avšak velmi nízké hodnoty lze považovat za chybu měření nebo jsou způsobeny nevhodnou manipulací se vzorkem popelu.

Podobně jako popel (tuhý zbytek odcházející gravitací na dně rotační pece) lze i popílek (drobné částice popelu odcházející z rotační pece spolu se spalinami) 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 peci 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. Tento aspekt je nutné zohlednit při interpretaci výsledků. Problém s nedostatečným vyhořením paliva se však vyskytoval pouze u hnědého uhlí. Při spalování palivové směsi MIX 1 byl nedopal v popelu přibližně 10 hm. %. U všech ostatních paliv se míra nedopalu v popelu pohybovala na vynikající úrovni do 1 % viz Tab. 18 a Tab. 19.

Tab. 18 Vyhodnocení množství nedopalu v popelu a popílku u dílčích paliv

		Hnědé uhlí	TAP 1	TAP 2	KAL 1	KAL 2	Lesní odpad
vlhkost popelu	[hm. %]	0,0	0,2	0,0	0,2	0,0	0,2
nedopal v sušině popelu	[hm. %]	88,5	0,1	0,0	0,2	0,3	0,5
vlhkost popílku	[hm. %]	-	-	1,0	-	3,6	-
nedopal v sušině popílku	[hm. %]	-	-	21,8	-	14,2	-

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. V průmyslové praxi je snaha se těmito podmínkám vyhnout, neboť nedopálené tuhé částice paliva mají větší sklon k zanášení teplosměnných ploch a spalinového potrubí. Důvodem snížené kvality spalovacích podmínek byla nutnost ponechat přídatný hořák na zemní plyn po dobu zkoušek s MIX 3 a 4 vypnutý.

Tab. 19 Vyhodnocení množství nedopalu v popelu a popílku u palivových směsí

		MIX 1	MIX 2	MIX 3	MIX 4	MIX 6
vlhkost popelu	[hm. %]	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0
nedopal v sušině popelu	[hm. %]	10,6	0,1	0,1	0,1	0,0
vlhkost popílku	[hm. %]	-	1,5	2,2	1,7	-
nedopal v sušině popílku	[hm. %]	-	29,1	65,9	58,9	-

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

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 6.6).

6.5.3 Provozní problémy

V této kapitole jsou představeny hlavní provozní problémy, ke kterým došlo během experimentální činnosti. Tyto problémy souvisely zejména s podáváním paliva pomocí šnekového dopravníku, anebo tvorbou nápeků a aglomerátů z popelu. Zkušenosti s jednotlivými problémy a jejich řešením byly odborně reflektovány a přetaveny do provozních doporučení v kapitole 7.

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. 41). Zkouška byla přerušena, šnek narovnan a vyztužen vložení a navařením trubky do jeho části. Původně bezosý šnek byl nově zpevněn trubkou viz Obr. 42. Pro zajištění bezproblémového pokračování spalovacích zkoušek byl lesní odpad drcen na menší frakci. Při drcení došlo k poklesu vlhkosti paliva.



Obr. 41 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. Průhledítkem na zadní straně pece bylo viditelné, že palivo vychází z trubky ve zhutněném a plastickém stavu. Během zkoušek došlo i k úplnému ucpání podávací trubky a zkroucení nezpevněné části konce šneku viz Obr. 42. Další zkoušky tedy byly přerušeny a byl objednan nový šnek s upravenou geometrií.



Obr. 42 Zkroucení podávacího šneku při dávkování TAP 1

Nový šnek s upravenou geometrií, délkou a v robustním nerezovém provedení (viz Obr. 43) již nevykazoval žádné provozní problémy.



Obr. 43 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. 44). 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 zchlazení pece tento prstenec mechanicky odstraněn, aby nedošlo k ovlivnění dalších experimentů.



Obr. 44 Aglomeráty (až 12 cm dlouhé) v popelu při spalování KAL 1

Během spalovacích zkoušek se směsí MIX 2 došlo z důvodu změny tlakových podmínek v peci k výpadku přídavného hořáku. Během tohoto výpadku byl pozorován jev, při kterém se dávkované palivo v podávací trubce speklo. Palivo vstupovalo do rotační pece v plastickém stavu. Díky nové konstrukci šneku nedošlo k jeho deformaci a dávkování tohoto paliva bylo bezproblémové. Po najetí přídavného hořáku se palivo v podávací trubce přestalo spékat a bylo do pece dávkováno v sypkém stavu.

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 výrazně odlišné vlastnosti v porovnání s palivem TAP 1 viz kapitoly 6.1.2 a 6.1.3. Hlavním rozdílem je, že TAP 2 nebylo peletizováno a mělo tedy nízkou objemovou hmotnost. V důsledku toho docházelo k výraznému klenbování paliva v násypce (tj. zásobníku paliva) podávacího zařízení a tím k nerovnoměrnému dávkování paliva do rotační pece. Z důvodu nerovnoměrného dávkování paliva byly naměřeny kolísající hodnoty emisí TOC a CO. Tento negativní aspekt byl potlačen 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. Ke klenbování paliva docházelo i při zkouškách se směsí MIX 2, 3 a 4 z důvodu vysokého zastoupení paliva TAP 2 s nízkou objemovou hmotností.

Z důvodu určitého obsahu plastů v TAP 2 a zároveň obsahu snadno tavitelného popelu v KAL 2 došlo při spalování směsí MIX 3 a 4 u čela pece k tvorbě nežádoucích nápeků na stěny pece viz Obr. 45. Je pravděpodobné, že tyto nápeky mají původ už ve spalovacích zkouškách s palivovou směsí MIX 2. 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 viz kapitola 6.5.2. Tvorba CO byla výrazná (viz následující kapitola), docházelo tedy k nedokonalému spalování.



Obr. 45 Nápeky ve vstupní části pece po spalovací zkoušce s MIX 2 – 4

Po částečném snížení provozních teplot operátor vyzkoušel, zda opětovné zapálení přídatného hořáku na minimální výkon znovu způsobí natavování paliva na sněhy pece. Po přibližně 30 minutách provozu hořáku opět došlo k natavování popelu a bylo konstatováno, že s touto palivovou směsí není provoz přídatného hořáku na zemní plyn z důvodu tvorby nežádoucích nápeků na stěny rotační pece možný.

Při dávkování směsi MIX 6 a naplnění násypky až po okraj docházelo ke klenbování paliva. Z tohoto důvodu bylo palivo přidáváno do násypky postupně a bylo operátorem v pravidelných intervalech promícháváno.

Další menší komplikací byl výpadek měření teploty termočlánkem uprostřed rotační pece, ke kterému došlo při spalovacích zkouškách s lesním odpadem, KAL 1 a MIX 1. Z tohoto důvodu není na Obr. 32, Obr. 34 a Obr. 35 vykreslena modrá křivka. To ale nijak zásadně nevádí. Stabilní spalovací podmínky v rotační peci lze posoudit na základě zbývajících dvou termočlánků. Důležitý je hlavně první termočlánek umístěný nejbližší čelu pece. V průmyslové praxi se běžně měření teploty po délce pece nepoužívá. Operátor si musí vystačit s měřením teploty na výstupu z pece.

Dílčí provozní poznatek souvisí s nastavením průtoku trubkového chladiče. Během zkoušek byl v jednu chvíli z tohoto zařízení zaznamenán výrazný hluk. Operátor zaznamenal nárůst teploty vody na výstupu chladiče na 51 °C. Již při této teplotě pravděpodobně došlo k lokální tvorbě páry uvnitř trubek chladiče. To může být způsobeno nedokonalou distribucí chladicí vody v trubkách. Jakmile operátor zvýšil

průtok chladicí vody z 3,8 na 5,2 m³/hod, tento jev vymizel. Je doporučeno udržovat takový průtok vody chladičem, aby teplota výstupní vody nepřesahovala 45 °C.

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.

6.6 Vyhodnocení emisní tvorby – O₂, CO, NO₂, SO₂, TOC, HCl, HF a NH₃

Během spalovacích zkoušek byly měřeny a zaznamenávány plynné emise O₂, CO, NO₂, SO₂, TOC, HCl, HF, NH₃ a Hg. Tyto emise byly měřeny v bodě Mo anebo v bodě M1 (viz Obr. 12).

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. Výsledky jsou uvedeny v tabulkách Tab. 20 a Tab. 21. Plynné emise Hg jsou z důvodu provázanosti emisních limitů vyhodnoceny v kapitole 6.8. Naměřené hodnoty emisí mohou být podkladem pro případnou formulaci nároků na systémy čištění spalin při spalování konkrétních paliv.

Koncentrace O₂ ve spalinách je naprosto klíčový ukazatel, na jehož základě operátor spalovacího zařízení reguluje průtok spalovacího vzduchu, případně výkon hořáku na zemní plyn/rychlost dávkování tuhého paliva. Při spalování tuhých paliv jsou typické hodnoty koncentrace O₂ ve spalinách 10 %. Tato hodnota byla během některých spalovacích zkoušek překročena, což z hlediska věrohodnosti naměřených dat není problematické. 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 (limit 5 mg/m³) jsou spolu s koncentrací O₂ ve spalinách klíčovým ukazatelem, podle kterého je řízen spalovací proces. Zvýšené koncentrace CO indikují nedokonalé spalování vlivem podchlazení pece, nedostatku spalovacího vzduchu či jeho nedostatečné distribuce atd. Tyto emise byly výrazně překročeny při spalování MIX 3 a 4 z důvodu podchlazení pece. Provoz přídatného hořáku na zemní plyn nebyl z důvodu tvorby nápeků na stěnách pece možný.

Zvýšené emise NO₂ (limit 225 mg/m³) jsou indikátorem zvýšených spalovacích teplot anebo zvýšeného obsahu dusíku v palivu. Snížení negativních dopadů NO₂ probíhá eliminací jejich produkce úpravou spalovacích podmínek anebo čištěním spalin pomocí katalytické/nekatalytické redukce těchto látek.

Emise SO₂ (limit 60 mg/m³) 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 nejen u samostatných paliv KAL 1 a KAL 2, ale také u jejich směsí (souvisí s obsahem prchavé síry v palivu viz Tab. 6)

Emise TOC (limit 75 mg/m³) indikují přítomnost organického uhlíku ve spalínách, což je signálem nízkých teplot, za kterých tyto látky nemohou zcela oxidovat. Zvýšené naměřené hodnoty souvisí s umístěním měřící aparatury, jak bude blíže vysvětleno u Obr. 50.

Tab. 20 Plynné emise při spalování dílčích paliv (O₂, SO₂, NO₂, CO a TOC)

Emise	*	Jed.	Hnědé uhlí	TAP 1	TAP 2	KAL1	KAL2	Lesní odpad	Limit
O ₂	S	%	10,0	15,0	14,7	11,7	14,7	11,2	-
CO	RSN	mg/m ³	26,0	278,0	136,0	15,0	103,0	210,0	5
NO ₂	RSN	mg/m ³	227,0	1204,0	417,0	1339,0	1069,0	194,0	225
SO ₂	RSN	mg/m ³	250,0	104,0	21,0	4734,0	5184,0	0,0	60
TOC	RSN	mg/m ³	429,0	153,0	3,0	1227,0	7,0	5,0	75

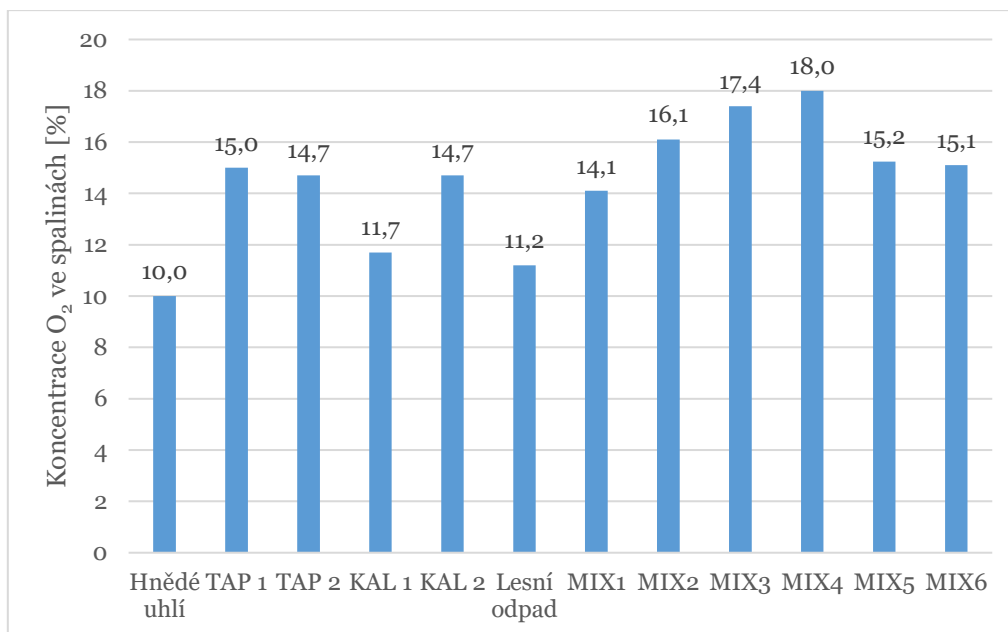
* S – suchý plyn; RSN – suchý plyn, normálové podmínky a referenční kyslík 6 %

Tab. 21 Plynné emise při spalování palivových směsí (O₂, SO₂, NO₂, CO a TOC)

Emise	*	Jed.	MIX 1	MIX 2	MIX 3	MIX 4	MIX 5	MIX 6	Limit
O ₂	S	%	14,1	16,1	17,4	18,0	15,2	15,1	-
CO	RSN	mg/m ³	273,8	246,0	1728,0	2332,0	221,5	4,0	5
NO ₂	RSN	mg/m ³	578,3	620,0	1138,0	1504,0	759,2	498,0	225
SO ₂	RSN	mg/m ³	421,2	113,0	509,0	1452,0	2477,1	316,0	60
TOC	RSN	mg/m ³	200,2	0,0	14,0	30,0	4	4,0	75

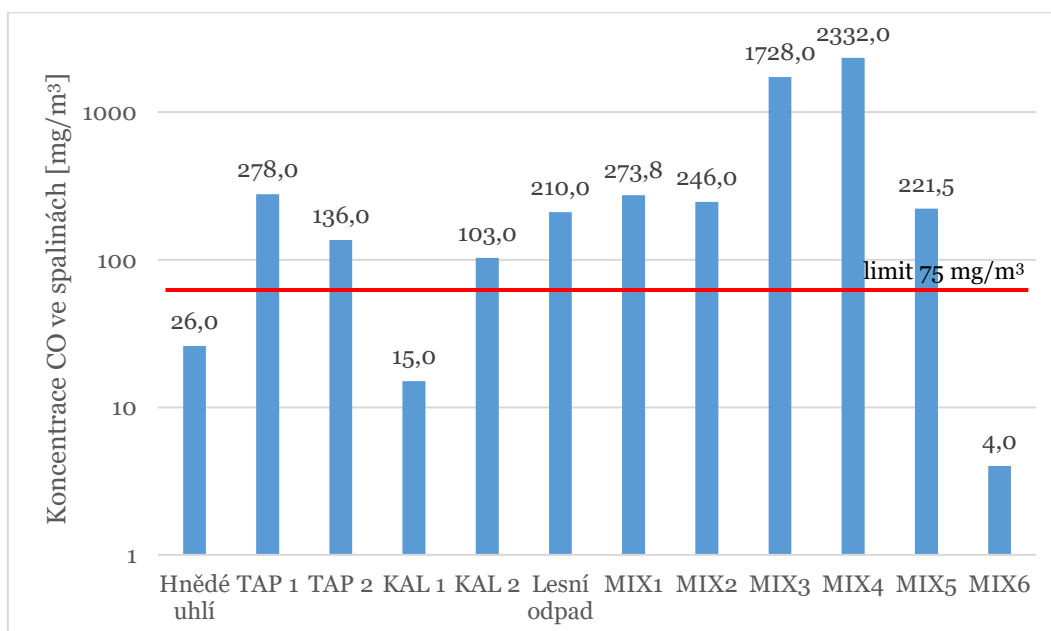
* S – suchý plyn; RSN – suchý plyn, normálové podmínky a referenční kyslík 6 %

Koncentrace O₂ ve spalínách je zobrazena v grafu na Obr. 46. Jakmile operátor snížil množství spalovacího vzduchu, aby snížil výrazně nadstechiometrický poměr spalovacího vzduchu, emise CO v důsledku nedokonalého spalování prudce vzrostly. Z tohoto důvodu bylo nutné udržovat velký přebytek vzduchu. Aby bylo dosaženo kvalitního spalování s nižšími přebytky vzduchu, muselo by dojít k několika zásadním úpravám rotační pece. O těchto možnostech dále pojednává kapitola 7.



Obr. 46 Koncentrace O₂ ve spalinách v bodu M1

Emisní limit pro koncentraci CO ve spalinách je 75 mg/m³. Z důvodu nedostatečného promíchávání paliva se spalovacím vzduchem byl tento limit překročen téměř při všech spalovacích zkouškách s výjimkou hnědého uhlí, KAL 1 a směsi MIX 6. Nejvyšší hodnoty koncentrace CO byly naměřeny při spalování směsi MIX 3 a MIX 4, při kterých musel být z technologických důvodů vypnutý přídatný hořák na zemní plyn. Pro zlepšení kvality spalování lze navrhnout určitá technologická opatření, o kterých blíže pojednává kapitola 7.



Obr. 47 Koncentrace CO ve spalinách v bodu M1 včetně srovnání s emisním limitem

Emisní limit pro NO₂ byl s výjimkou spalování lesního odpadu vždy překročen. U lesního odpadu došlo díky vysoké vstupní vlhkosti paliva k rozložení teplot po délce pece a ke snížení spalovacích teplot. Jinými slovy v tomto případě nedocházelo

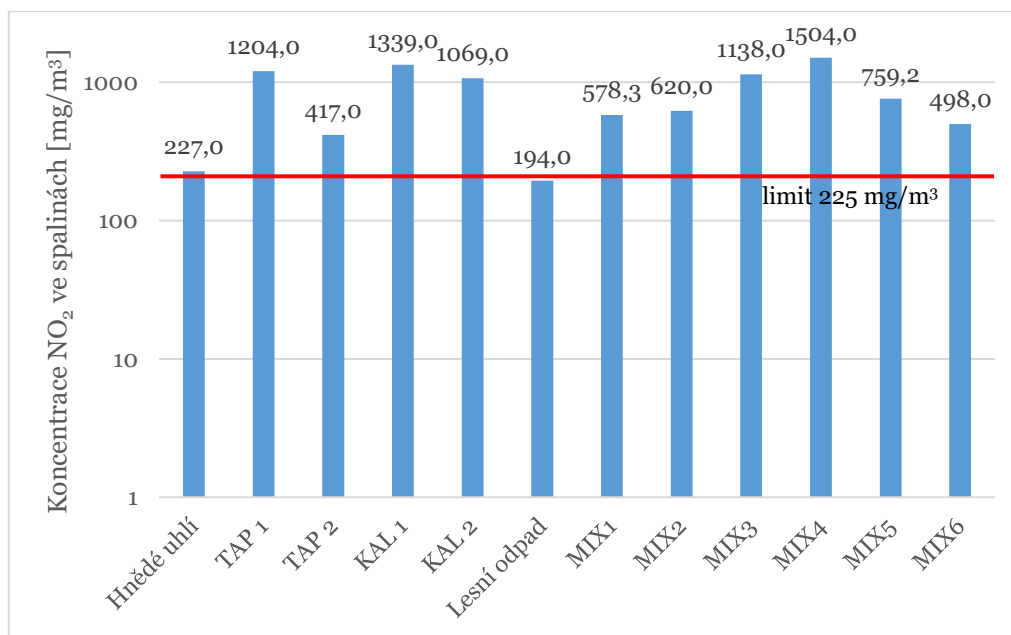
k intenzivnímu hoření paliva hned u čela pece, ale také dále během průchodu rotační pecí. Díky tomu byly naměřeny nejnižší emise NO_2 , které jako jediné splňují emisní limit i bez dodatečného systému čištění spalin.

Lze předpokládat, že za relativně vysokou tvorbu NO_2 stojí nejen tzv. termické NO_2 , které vznikají při teplotách nad $1050\text{ }^\circ\text{C}$, ale rovněž tzv. palivové NO_2 , jejichž původ je přímo v tuhém palivu. Tab. 6 uvádí obsah dusíku v jednotlivých palivech. Srovnání těchto hodnot s tvorbou NO_2 napovídá, že dusík obsažený v palivu je spoluzodpovědný za zvýšenou tvorbu NO_2 . Vyšší obsah dusíku mají KAL 1 a KAL 2.

Vlivem nápeků ze zkoušek s KAL 1 docházelo při spalovacích zkouškách s TAP 1 k hromadění paliva ve vstupní části pece a ke tvorbě teplotních špiček. Ke tvorbě těchto špiček docházelo navzdory faktu, že byl z důvodu obavy z vysokých teplot v první části pece a obavy z další tvorby nápeků na stěnách pece, po dobu spalovacích zkoušek s palivem TAP 1 přídatný hořák na zemní plyn vypnutý. Při spalovacích zkouškách s TAP 1 byly zaznamenány zvýšené emise NO_2 . Je otázkou, zda by k tvorbě teplotních špiček docházelo i v případě, kdy by se vlivem napečeného prstence z předchozích zkoušek palivo TAP 1 nehromadilo u čela pece. Zvýšené oxidy dusíku totiž mohou být i důsledkem obsahu plastů v tomto palivu, které rychle hoří a mohou mít sami o sobě vliv na tvorbu teplotních špiček.

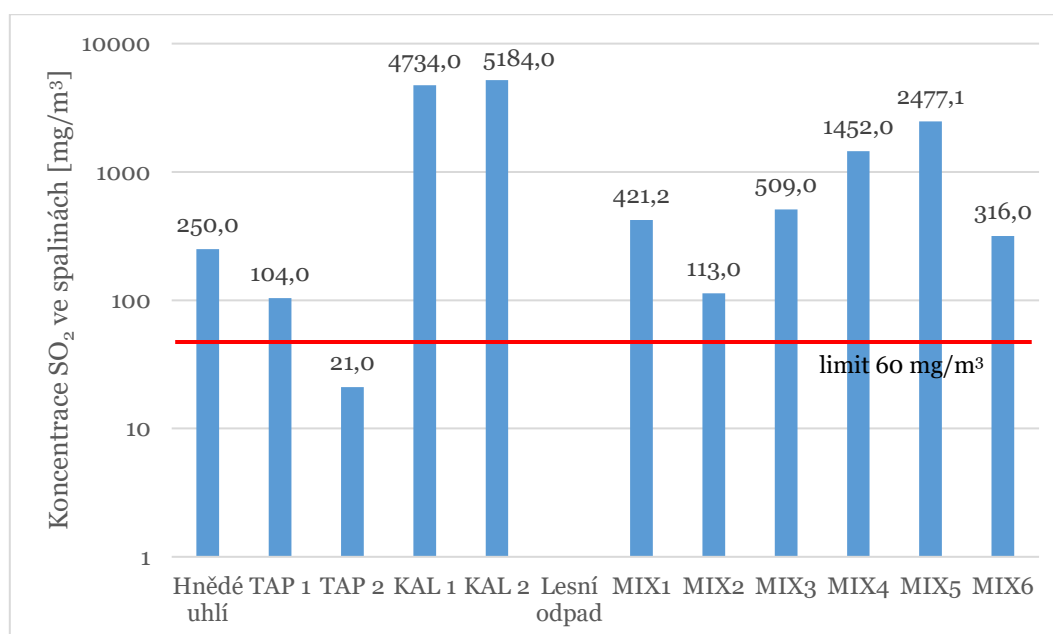
Právě paliva TAP 1 a KAL 1 a 2 vykazovala vysokou míru tvorby NO_x . Zjevný je rovněž trend vzrůstající tvorby NO_x při rostoucím zastoupení paliva KAL 2 v palivové směsi (viz směsi MIX 2 – 4).

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. 48 Koncentrace NO_2 ve spalinách v bodu M1 včetně srovnání s emisním limitem

Emisní hodnoty SO₂ při spalování obou čistírenských kalů byly extrémně vysoké a několiknásobně převyšovaly emisní limit (viz Obr. 49). Příčinnou je vysoký obsah prchavé síry v tomto palivu, jak dokládá Tab. 6. Emisní limit byl dodržen pouze v případě paliva TAP 2 a lesního odpadu. V palivových směsích (ve všech se v určité míře vyskytoval čistírenský kal) byl limit SO₂ překročený. Koncentrace SO₂ je přímo úměrná hmotnostnímu podílu čistírenského kalu v palivové směsi. Tento trend je zjevný a odpovídá původním předpokladům. Překvapivé výsledky však přinesla analýza odhadované tvorby emisí. V tomto výpočtu je na základě naměřených emisí při spalování dílčích složek paliv vypočtena teoretická tvorba emisí při spalování palivových směsí. Výpočet je založen na pákovém pravidlu. Podrobněji o tomto výpočtu a srovnání s reálně naměřenými emisemi pojednává kapitola 6.10.



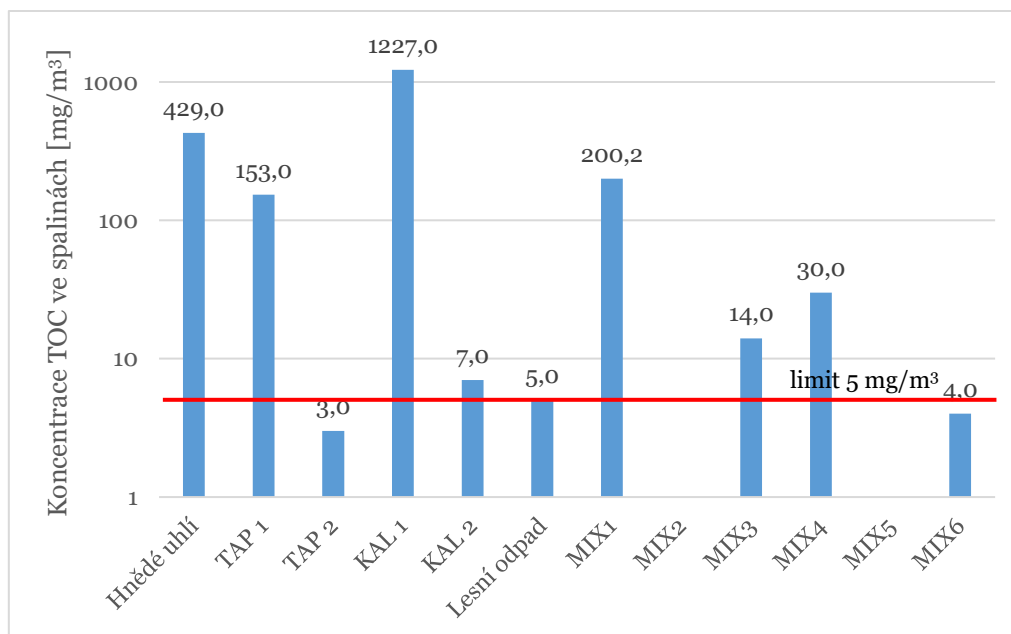
Obr. 49 Koncentrace SO₂ ve spalinách v bodu M1 včetně srovnání s emisním limitem

Nadlimitní tvorba TOC při spalování MIX 3 a MIX 4 (emise měřeny v bodě M1) souvisí s nízkými spalovacími teplotami, ke kterým došlo z důvodu nutnosti vypnutého přídavného hořáku. To indikuje nedokonalé spalování. U MIX 5 nebylo měření koncentrace TOC provedeno.

Měření koncentrace TOC (viz Obr. 50) je zatíženo faktem, že při spalovacích zkouškách s hnědým uhlím, TAP 1, KAL 1, lesním odpadem a MIX 1 byly tyto emise měřeny v měřicím bodě Mo (který se nachází těsně mezi rotační pecí a usazovací komorou), kde byly naměřeny překvapivě vysoké hodnoty těchto látek. Vysoká míra organických látek naměřená v bodě Mo přiměla operátora zkoušek ověřit tuto hodnotu v měřicím bodě M1 spalinové cesty. Bylo zjištěno, že při průchodu usazovací komorou a přibližně 2 metry dlouhým potrubním dojde k oxidaci těchto látek. Hodnoty TOC jsou v měřicím bodě M1 zanedbatelné. Proto jsou u výše zmíněných paliv naměřeny výrazně vyšší koncentrace TOC, než jaké dovoluje emisní limit. Měřicí bod Mo není pro měření koncentrace TOC vhodný.

V průmyslových podmínkách se při spalování odpadů v prvním stupni spalování vytváří organické látky, které jsou následně oxidovány v druhém stupni spalování.

V poloprovozním uspořádání na Zkušebně ÚPI lze jako první stupeň spalování chápat rotační pec, zatímco usazovací komoru a spalínové potrubí lze chápat jako druhý stupeň spalování. V reálných provozních podmínkách by se za rotační pecí nacházela dohořivací komora (druhý stupeň spalování), kde by došlo k oxidaci všech látek TOC a CO. V této komoře musí být dle legislativy spaliny zdrženy na teplotě nad 850 °C po dobu alespoň 2 vteřin.



Obr. 50 Koncentrace TOC ve spalínách v bodu Mo a M1 včetně srovnání s emisním limitem

Emise HCl, HF, NH₃ byly při všech spalovacích zkouškách měřeny v měřicím bodě M1 (viz Obr. 12). Výsledky pro dílčí paliva souhrnně uvádí Tab. 22, zatímco Tab. 23 uvádí emisní hodnoty pro palivové směsi. 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 mg/m³) pro HCl dodržen.

Tab. 22 Plynné emise při spalování dílčích paliv (HCl, HF, NH₃)

Emise	*	Jed.	Hnědé uhlí	TAP 1	TAP 2	KAL 1	KAL 2	Lesní odpad	Limit
HCl	RSN	mg/m ³	1,0	1,9	1,9	0,7	5,8	0,9	12
HF	RSN	mg/m ³	3,4	0,6	~0	0,9	2,0	3,9	1,5
NH ₃	RSN	mg/m ³	-	~0	~0	18,7	~0	-	10

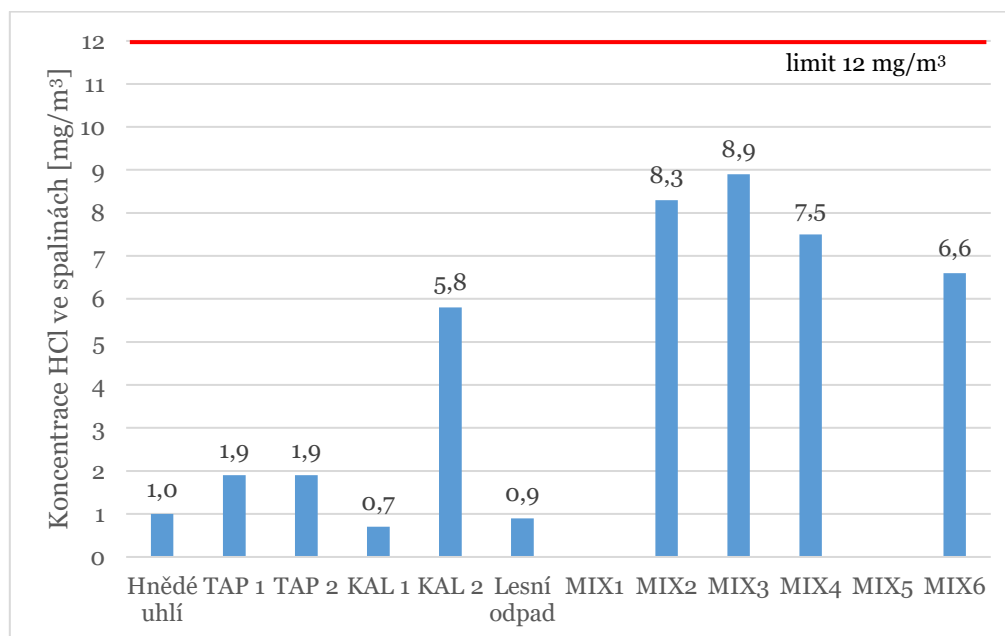
* RSN – suchý plyn, normálové podmínky a referenční kyslík 6 %; U buněk označených „-“, měření neproběhlo

Tab. 23 Plynné emise při spalování palivových směsí (HCl, HF, NH₃)

Emise	*	Jed.	MIX 1	MIX 2	MIX 3	MIX 4	MIX 5	MIX 6	Limit
HCl	RSN	mg/m ³	-	8,3	8,9	7,5	-	6,6	12
HF	RSN	mg/m ³	-	~0	~0	~0	-	2,9	1,5
NH ₃	RSN	mg/m ³	-	~0	~0	~0	-	~0	10

* RSN – suchý plyn, normálové podmínky a referenční kyslík 6 %; U buněk označených „-“, měření neproběhlo

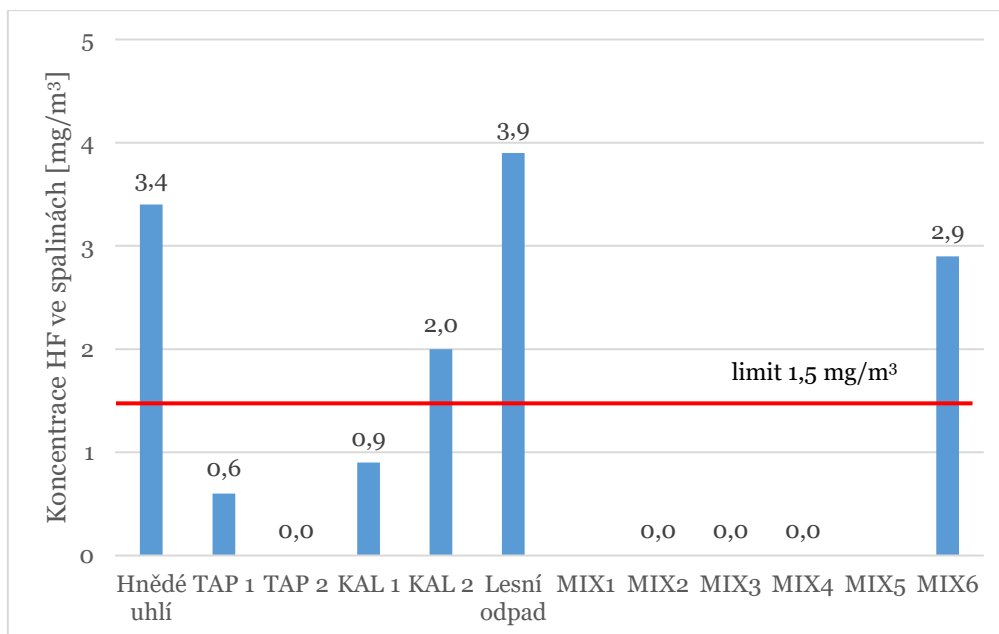
Srovnání naměřených emisí HCl v porovnání s emisním limitem je na Obr. 51. Zvýšená tvorba je patrná u paliva KAL 2 a všech jeho směsí. Lze předpokládat, že toto palivo obsahuje zvýšené množství chlóru. Při spalování směsí MIX 1 a 5 nebyly emise HCl hodnoceny.



Obr. 51 Koncentrace HCl ve spalinách

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 je 1,5 mg/m³. Tento limit byl překročen při spalování hnědého uhlí, KAL 2, lesního odpadu a MIX 6 (viz Obr. 52). Při spalování směsí MIX 1 a 5 nebyly emise HF hodnoceny. Překvapivá je nulová produkce HF při spalování směsí MIX 2 – 4. Vysvětlením mohou být různé provozní podmínky, ke kterým došlo během spalovacích zkoušek anebo emisní hodnota nacházející se pod rozsahem měřitelnosti.



Obr. 52 Koncentrace HF ve spalinách

Nenulová koncentrace NH_3 byla naměřena pouze při spalování KAL 1 na hodnotě 18,7 mg/m³ viz Tab. 22. V ostatních případech byly naměřeny emise NH_3 nulové nebo pod mezí detekce. V palivu KAL 1 se zřejmě nacházel amoniak. Při spalování jeho jediné palivové směsi MIX 1 nebyla koncentrace NH_3 ve spalinách měřena. Zastoupení KAL 1 je v této směsi však pouze 10 hm. %. Proto lze předpokládat, že při spalování této směsi může v omezené míře k produkci NH_3 dojít. Emisní tvorba NH_3 nebyla dále měřena u hnědého uhlí, lesního odpadu a MIX 5. U těchto paliv lze předpokládat nulovou/minimální tvorbu této sloučeniny.

Jako perspektivní palivová směs se prozatím jeví MIX 6, která vykázala nejnižší tvorbu NO_2 a druhou nejnižší tvorbu 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 NO_2 , případně SO_2 naměřená u těchto směsí je řešitelná pomocí systému čištění spalin. Emise HCl splnily limit i bez čištění spalin, hodnota produkce HF byla nulová.

6.7 Vyhodnocení množství 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 mg/m³.

Překvapivé výsledky přináší analýzy TZL ze třech měřících bodů podél spalinové trasy. Tyto body jsou umístěny tak (jak je blíže uvedeno v kapitole 4.3), aby bylo možné samostatně vyhodnotit míru zanášení v usazovací komoře a v trubkovém chladiči.

Výsledky analýz jsou však v rozporu s úvodním předpokladem, že hodnoty TZL se budou v důsledku úsad v usazovací komoře a trubkovém chladiči po trase snižovat. V případě všech spalovacích zkoušek byly v měřicím bodě Mo naměřeny hodnoty TZL nižší než v bodě M1. Bylo zjištěno, že příčinou tohoto jevu je nehomogenní proudění spalin v měřicím bodě Mo, čímž dochází ke zkreslení měření. Geometrie výstupní části pece a dispoziční možnosti Zkušebny bohužel neumožnily v případě měřicího bodu Mo dodržení pravidla minimální délky potrubí před (5 násobek průměru potrubí) a za (3 násobek průměru potrubí) měřicím bodem. Hodnoty všech emisí včetně TZL naměřené v tomto bodě nelze považovat za relevantní a není s nimi dále počítáno. Z tohoto důvodu jsou v této práci dále analyzovány pouze měřicí body M1 a M2. Jedná se o místa před a za chladičem, kde bylo dosaženo homogenního proudění spalin a kde nastaly vhodné podmínky pro měření. Měření v těchto dvou bodech umožňuje sestavit materiálovou bilanci trubkového chladiče. V Tab. 24 a Tab. 25 je na posledních řádcích uvedena rychlost usazování částic TZL v chladiči. Jedná se o množství částic v g/hod zachycených v chladiči nejen na teplosměnných plochách.

Tab. 24 Koncentrace TZL před a za chladičem a množství usazených částic na chladiči při spalování dřevních paliv

Emise	*	Jed.	Hnědé uhlí	TAP 1	TAP 2	KAL1	KAL2	Lesní odpad	Limit [mg/m ³]
TZL M1	RSN	mg/m ³	213,2	3358,4	414,6	170,7	332,8	N	7,5
TZL M2	RSN	mg/m ³	75,3	1009,6	82,0	64,4	103,8	N	7,5
Rychlost usazování	RSN	g/hod	38,4	347,9	52,9	25,9	31,4	N	-

* RSN – suchý plyn, normálové podmínky a referenční kyslík 6 %; M1 – měřicí bod před chladičem; M2 – měřicí bod za chladičem; N – nezměřeno (viz komentář níže)

Jak bylo řečeno v kapitole 3.9, spalování biomasy, kterou obsahovalo palivo TAP 1 ze 20 hm. %, může vykazovat vyšší tvorbu TZL [72]. 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 mg/m³ 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, jak dokládá Obr. 55. Při spalování tohoto typu odpadu lze předpokládat zvýšené zanášení teplosměnných ploch.

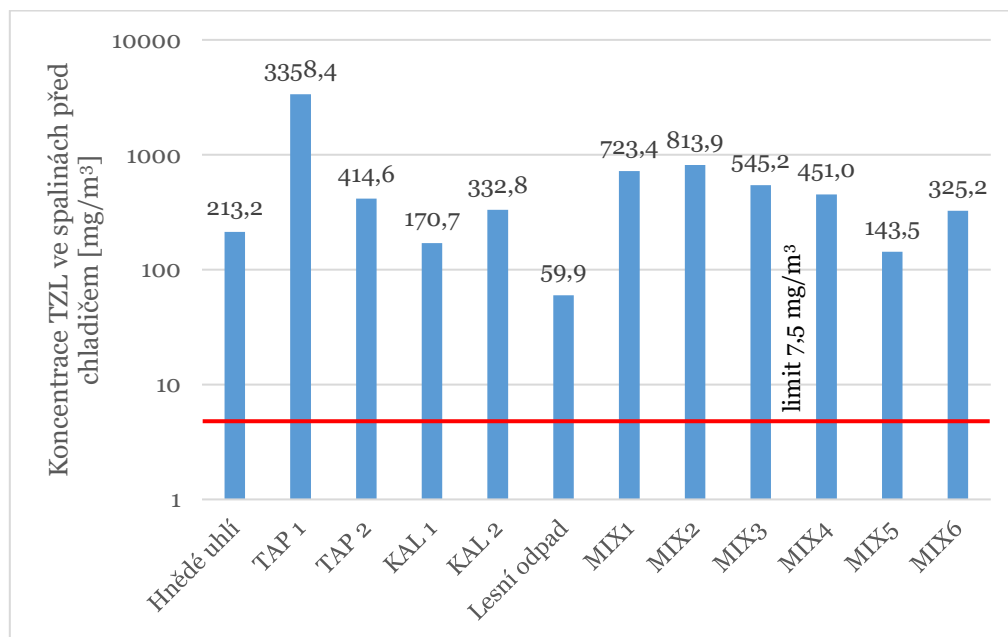
V případě lesního odpadu se v případě výchozích paliv nepodařilo relevantní hodnotu rychlosti usazování zaznamenat. Vzhledem k minimální tvorbě částic TZL (mezi 60 a 80 mg/m³) lze však předpokládat i minimální míru zanášení chladiče při spalování tohoto typu paliva. Při spalování směsi MIX 5 byla koncentrace TZL měřena pouze v bodě M1. Z tohoto důvodu nebylo možné vypočítat hmotnost částic usazených v chladiči.

Tab. 25 Koncentrace TZL před a za chladičem, množství usazených částic na chladiči při spalování palivových směsí

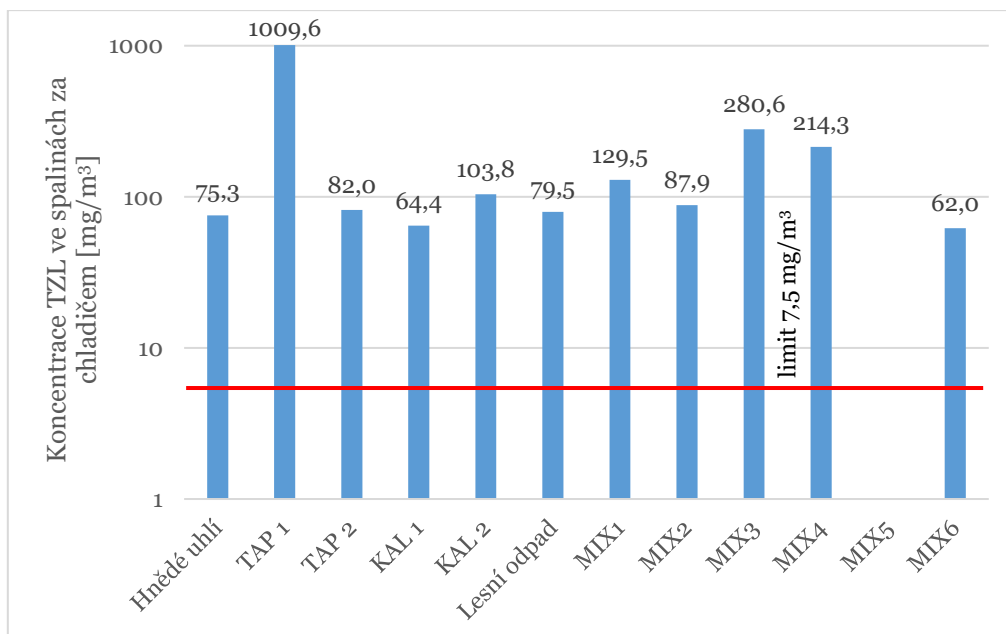
Emise	*	Jed.	MIX 1	MIX 2	MIX 3	MIX 4	MIX 5	MIX 6	Limit [mg/m ³]
TZL M1	RSN	mg/m ³	723,4	813,9	545,2	451,0	143,5	325,2	7,5
TZL M2	RSN	mg/m ³	129,5	87,9	280,6	214,3	-	62,0	7,5
Rychlost usazování	RSN	g/hod	112,2	86,4	24,7	19,2	-	38,2	-

* RSN – suchý plyn, normálové podmínky a referenční kyslík 6 %; M1 – měřicí bod před chladičem; M2 – měřicí bod za chladičem; U buněk označených „-“, měření neproběhlo

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 6.10.



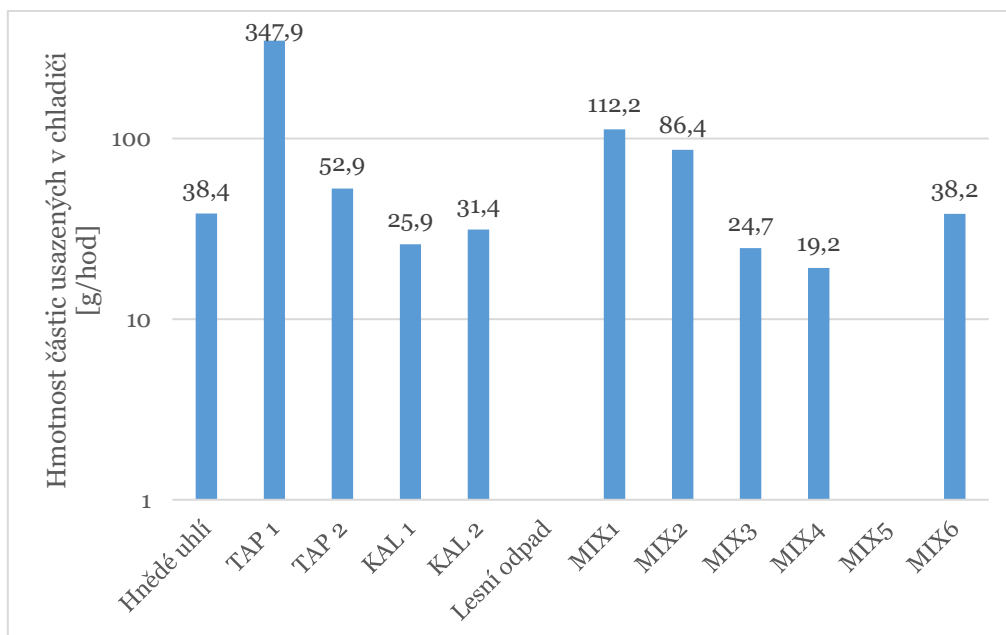
Obr. 53 Koncentrace TZL ve spalinách v bodu M1 před chladičem



Obr. 54 Koncentrace TZL ve spalínách v bodu M2 za chladičem

Emisní limit pro částice TZL byl překročen i při měření za chladičem spalin u všech spalovaných paliv a jejich směsí. Tyto částice byly zachyceny na rukávcovém filtru, který je součástí technologie.

Sloupcový graf popisující hmotnost částic usazených v chladiči (Obr. 55) relativně věrně kopíruje graf popisující koncentraci TZL v bodě M1 (Obr. 53). Na základě toho lze konstatovat, že bylo dosaženo uspokojivých experimentálních podmínek. Některé výsledky jsou však v rozporu s úvodními předpoklady a lze konstatovat, že jsou tyto výsledky zatíženy chybou způsobenou rozdílnými provozními podmínkami.



Obr. 55 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 vykázala druhou nejnižší hodnotu. Také směs MIX 5 se prozatím jeví jako velmi vhodná alternativa fosilních paliv, která vykázala 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.

6.8 Vyhodnocení složení emisí TZL a Hg

V kapitole 6.3 je uvedeno rozdělení proudů těžkých kovů do popelu a popílku. Z hlediska emisních limitů ve spalinách je nutné dodržet hodnoty koncentrací těžkých kovů ve třech skupinách. První skupina je vyčleněna pro kadmium a thalium, druhá skupina obsahuje rtuť a třetí skupina je souhrnně vyčleněna pro antimon, arsen, chrom, kobalt, mangan, měď, olovo a vanad. Naměřené hodnoty včetně srovnání s emisním limitem souhrnně uvádějí Tab. 26 a Tab. 27.

V průmyslové praxi jsou částice TZL zachyceny na částicových filtrech nebo elektrostatických odlučovačích. Míra kontaminace spalinového popílku těžkými kovy je rozhodující pro jeho uložení na běžné skládce, anebo na skládce nebezpečného odpadu.

Tab. 26 Koncentrace těžkých kovů ve spalinách při spalování dílčích paliv

Emise	*	Jed.	Hnědé uhlí	TAP 1	TAP 2	KAL1	KAL2	Lesní odpad	Limit
TKI: Cd, Tl	RSN	µg/m ³	7	39	59	41	220	8	5
TKII:Hg	RSN	µg/m ³	6	13	21	17	82	2	5
TKIII:Sb, As, Cr, Co, Mn, Cu, Ni, Pb, V	RSN	µg/m ³	802	5291	2630	2908	8005	1030	300

* RSN – suchý plyn, normálové podmínky a referenční kyslík 6 %;

Analýza kovů v první a třetí skupině je provedena z filtru částic TZL. Rtuť z druhé skupiny je absorbována do speciálního roztoku. Pohled do Tab. 26 ukazuje, že nejvyšší hodnoty emisí vykazují prvky ze souhrnné třetí skupiny u všech paliv. Nejvyšší hodnoty v rámci všech emisních skupin byly naměřeny u KAL 2. Pozoruhodný je velký rozdíl mezi oběma čistírenskými kaly. Je patrné, že složení těchto typů paliv vykazuje velkou variabilitu.

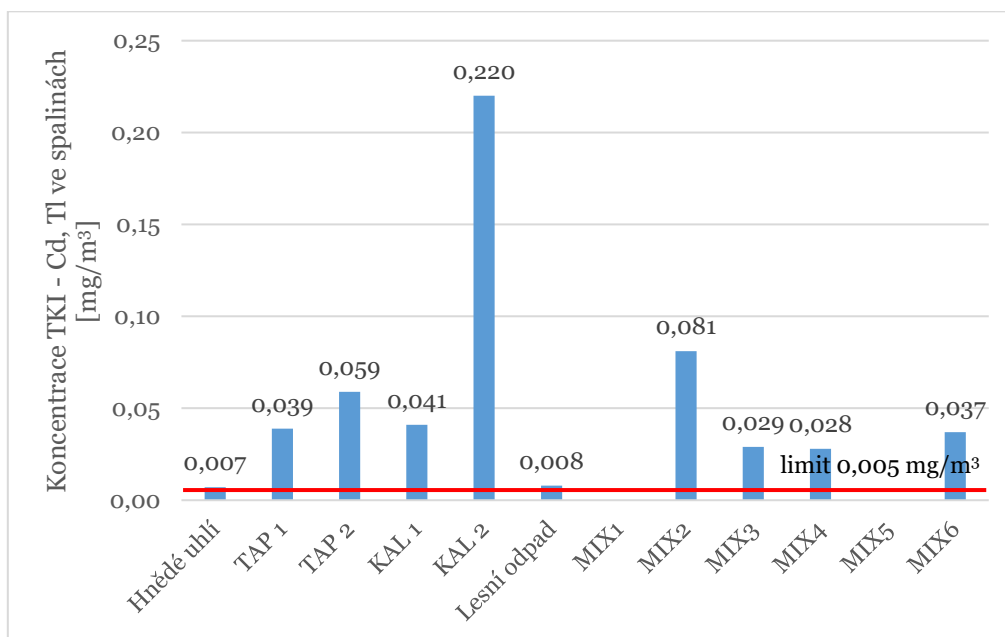
Tab. 27 Koncentrace těžkých kovů ve spalínách při spalování palivových směsí

Emise	*	Jed.	MIX 1	MIX 2	MIX 3	MIX 4	MIX 5	MIX 6	Limit
TKI: Cd, Tl	RSN	µg/m ³	-	81	29	28	-	37	5
TKII:Hg	RSN	µg/m ³	-	11	9	7	-	11	5
TKIII:Sb, As, Cr, Co, Mn, Cu, Ni, Pb, V	RSN	µg/m ³	-	3390	1445	905	-	3416	300

* RSN – suchý plyn, normálové podmínky a referenční kyslík 6 %; U buněk označených „-“, měření neproběhlo

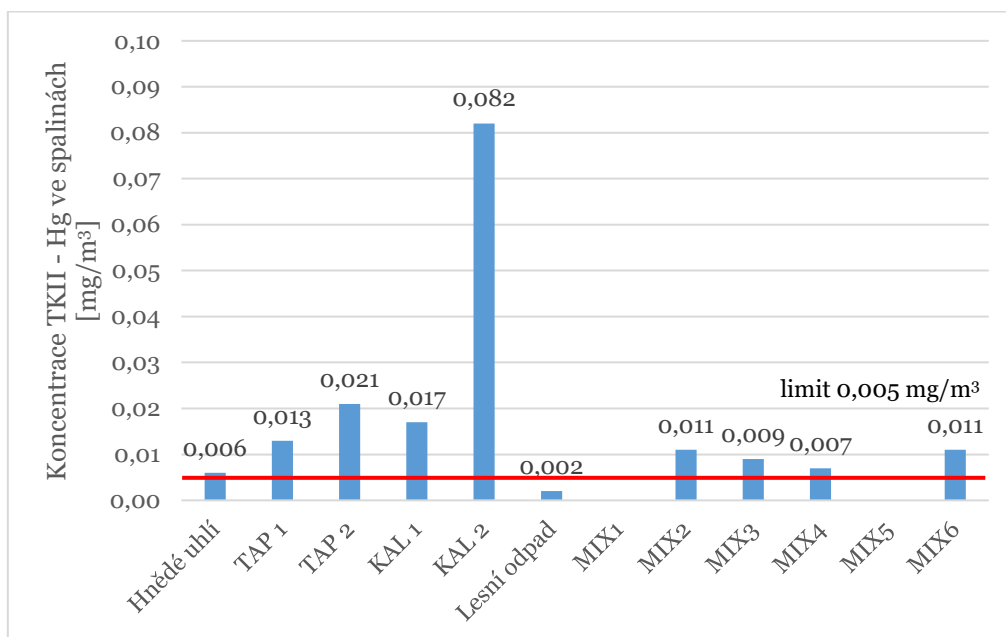
Vysoké emisní hodnoty byly naměřeny také u všech směsí. U směsí se zastoupení KAL 2 je zjevné, že právě vysoké zastoupení tohoto paliva je zodpovědné za zvýšené emise TK. Oproti předpokladům bylo zjištěno, že vyšší míra zastoupení KAL 2 (na TK velmi bohaté palivo) ve směsi vedla k nižší koncentraci TK v popílku. Pohled do Tab. 16 odhaluje, že tyto TK skončily v popelu. Tento jev patrný u všech tří skupin TK (viz komentáře níže) může být způsobený nižšími provozními teplotami, jakých bylo dosaženo při spalování směsí MIX 3 a 4.

Vysoká emisní tvorba TK v první skupině prvků (kadmium a thalium) byla zaznamenána během všech spalovacích zkoušek. Pouze lesní odpad a hnědé uhlí by téměř splnily emisní limit této skupiny prvků bez systému čištění spalin. Výsledky jsou graficky zobrazeny na Obr. 56. Je překvapivé, že palivové směsi MIX 2 – 4 nevykazují vyšší emise těchto prvků, přestože je u těchto směsí vyšší zastoupení na tyto prvky velmi bohatého paliva KAL 2.



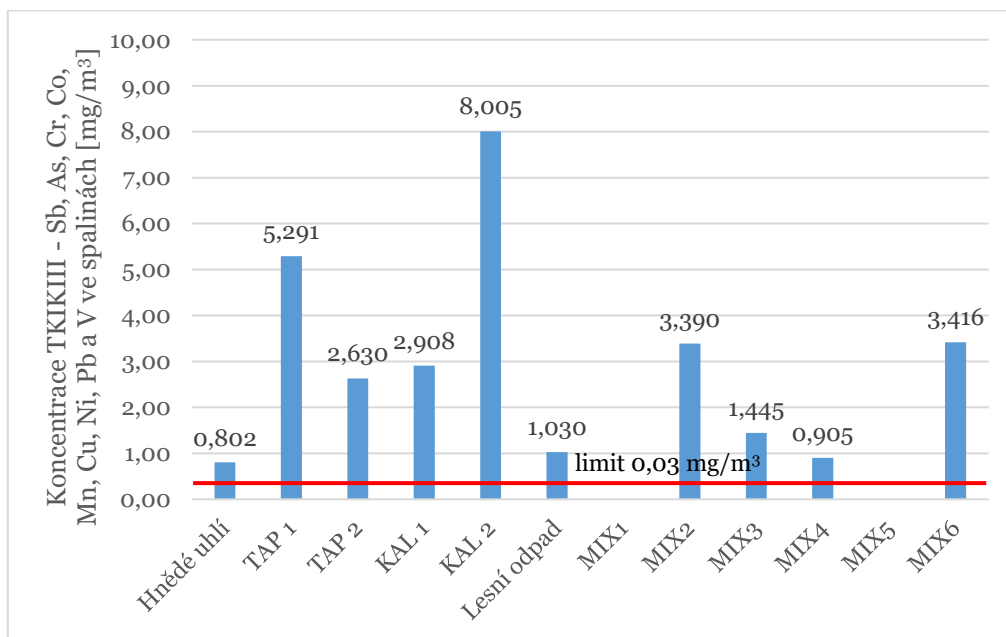
Obr. 56 Koncentrace těžkých kovů Cd a Tl ve spalínách

Srovnání výsledků emisních měření rtuti a srovnání s emisním limitem je graficky zobrazeno na Obr. 57. Obdobně jako v případě prvků v první emisní skupině byla velmi vysoká hodnota rtuti naměřena u KAL 2, což však opět nemělo vliv na nárůst těchto emisí u směsí MIX 2 – 4.



Obr. 57 Koncentrace Hg ve spalinách

Emisní limity pro těžké kovy (TK) ve třetí emisní skupině jsou s emisním limitem graficky srovnány na Obr. 58. I v tomto případě vykazují emisní hodnoty u KAL 2 výrazně vyšší hodnoty než u KAL 1 a ostatních paliv. To opět podtrhuje vysokou variabilitu složení těchto paliv. I v tomto případě nebylo u směsí MIX 2 – 4 naměřeno vyšší množství emisí TK tak, jak bylo odhadováno dle vyššího zastoupení paliva KAL 2. Tyto překvapivé výsledky budou analyzovány v rámci dalších výzkumných aktivit ÚPI.



Obr. 58 Koncentrace těžkých kovů Sb, As, Cr, Co, Mn, Cu, Ni, Pb a V ve spalinách

V reálných provozních podmínkách by došlo k záchytu částic první a třetí emisní skupiny na částicových filtrech či elektrostatických odlučovačích a dle koncentrace TK k jejich uložení na skládkách běžného/nebezpečného odpadu. Rtuť z druhé emisní skupiny lze účinně vyčistit obdobným způsobem jako HF například metodou mokré vypírky v tzv. Venturiho prašce.

Výsledky těchto emisních měření nejsou pro volbu vhodné palivové směsi zcela zásadní, neboť tyto látky budou v každém případě odloučeny v systému čištění spalin. Stále platí, že jako perspektivní palivové směsi lze označit směsi MIX 6 a také MIX 5. S jistými výhradami lze doporučit směsi MIX 1 a 2.

6.9 Identifikace kritických míst teplosměnných ploch z hlediska jejich zanášení

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 proběhla demontáž chladiče. Ještě před tím, než došlo k zastavení dávkování paliva a vypnutí přídavného hořáku, byl na chladiči spalin klapkou nastaven bypass. Tento postup byl zvolen proto, aby při sjíždění z provozních parametrů pece nedošlo k ovlivnění zanesení teplosměnných ploch chladiče. Jakmile došlo k úplnému vychladnutí technologie, byla vypuštěna chladicí voda a chladič byl rozebrán viz Obr. 59. 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. 59 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 nános. Na straně ofukované horkými spalinami došlo k tvorbě zpečeného – nataveného nános, 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. 59 je dobře viditelné, že segment vlevo je více zanesený než segment vpravo.

Spaliny mají tendenci procházet místem s nejmenším odporem. V místech, kde nestojí spalinám v cestě chladičí trubky, je evidentní vysoká míra zanesení dna chladiče Obr. 60. V těchto místech, kde bylo množství procházejících spalin nejvyšší, je rovněž pozorovatelné zvýšené zanášení koncových oblouků chladičích trubek viz Obr. 61.



Obr. 60 Stav chladiče spalin po spalovacích zkouškách (směr proudění spalin byl zleva doprava)



Obr. 61 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. V rámci experimentální části práce nebylo z finančních důvodů možné pro každé palivo realizovat dlouhodobé spalovací zkoušky. Jeden den poloprovozních testů vyjde přibližně na 100 000,- Kč. Následující výpočet je proveden na základě spalovací zkoušky se směsí MIX 6 po 10 hodinách provozu.

Výpočet tepla přijatého chladičí vodou vychází z předpokladu, že jsou průtoky chladičí vody jednotlivými sekcemi chladiče shodné. Díky tomu lze určit výstupní směšnou teplotu vody jako aritmetický průměr výstupních teplot ze 4 sekci chladiče. Pokud je známa vstupní a výstupní teplota chladičí vody, lze dopočítat její vstupní a výstupní entalpii a ze znalosti průtoku pak určit přijaté teplo. Teplo odevzdané spalinami lze rovněž vypočítat jako součin rozdílů vstupní a výstupní entalpie spalin s jejich průtokem.

Vyhodnocení účinnosti výměny tepla na začátku a konci spalovací zkoušky s MIX 6 přineslo zajímavé výsledky. Tato účinnost byla vypočítána jako podíl tepla přijatého chladicí 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.**

Hlubší analýza zanášení teplosměnných ploch během provedených spalovacích zkoušek není obsahem této dizertační práce. Touto problematikou se ve své dizertační práci „Modelování zanášení procesních a energetických zařízení tuhými znečišťujícími látkami“ zabývá kolega Ing. Jiří Strouhal.

6.10 Srovnání odhadovaných a reálně naměřených emisí

V této kapitole jsou srovnány odhadované a reálně naměřené emise TZL, SO₂ a NO₂. Analýza tvorby CO nedává z tohoto hlediska smysl, neboť tvorba CO je zcela závislá na provozních podmínkách v peci.

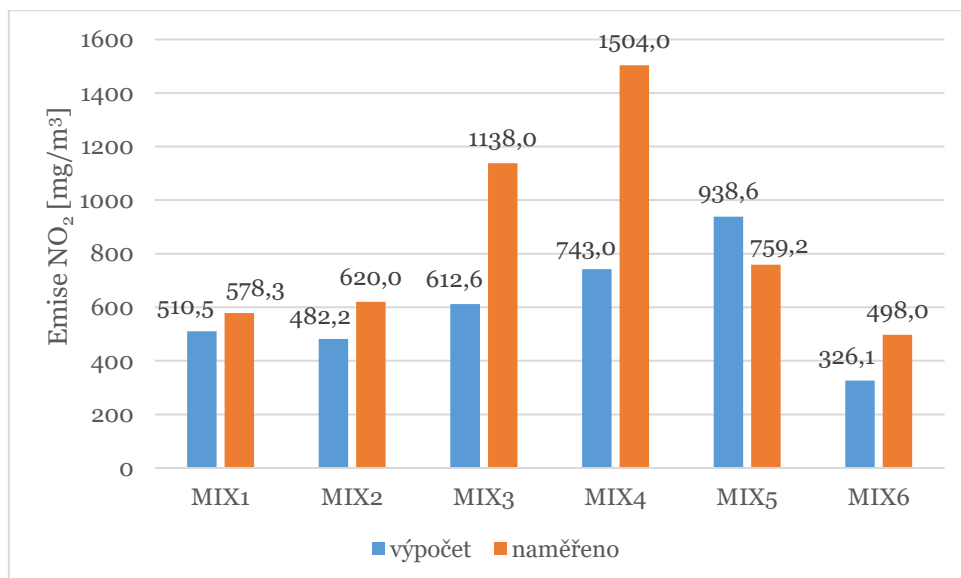
Odhad tvorby emisí u palivových směsí vychází z výsledků spalovacích zkoušek s dílčími palivovými složkami na základě pákového pravidla. Pokud by například při spalování čistírenského kalu byla naměřená tvorba 100 mg/m³ SO₂, zatímco při spalování lesního odpadu by byla naměřena jeho nulová koncentrace, pak by byla v jejich směsi 1:1 odhadována tvorba 50 mg/m³ SO₂.

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 NO₂ 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 NO₂ je velmi závislá na provozních podmínkách v peci (zejména na provozní teplotě viz kapitola 6.5.1). 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.

Tab. 28 Porovnání emisí NO₂ naměřených a odhadovaných na základě výpočtu

Emise NO ₂				
	výpočet	naměřeno	Δ	%
MIX 1	510,5	578,3	67,8	13
MIX 2	482,2	620,0	137,8	29
MIX 3	612,6	1138,0	525,4	86
MIX 4	743,0	1504,0	761,0	102
MIX 5	938,6	759,2	-179,4	-19
MIX 6	326,1	498,0	171,9	53

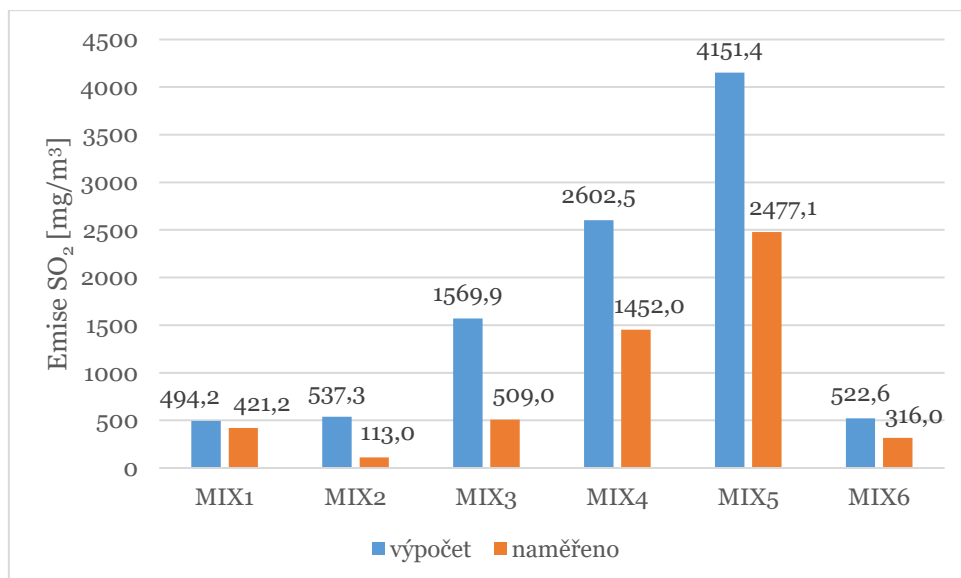


Obr. 62 Porovnání emisních hodnot NO₂ naměřených a odhadovaných na základě výpočtu

Z analýzy odhadované a reálně naměřené koncentrace SO₂ (Tab. 29 a Obr. 63) 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 SO₂ 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 SO₂.

Tab. 29 Porovnání emisních hodnot SO₂ naměřených a odhadovaných na základě výpočtu

Emise SO ₂				
	výpočet	naměřeno	Δ	%
MIX 1	494,2	421,2	-73,1	-15
MIX 2	537,3	113,0	-424,3	-79
MIX 3	1569,9	509,0	-1060,9	-68
MIX 4	2602,5	1452,0	-1150,5	-44
MIX 5	4151,4	2477,1	-1674,3	-40
MIX 6	522,6	316,0	-206,6	-40



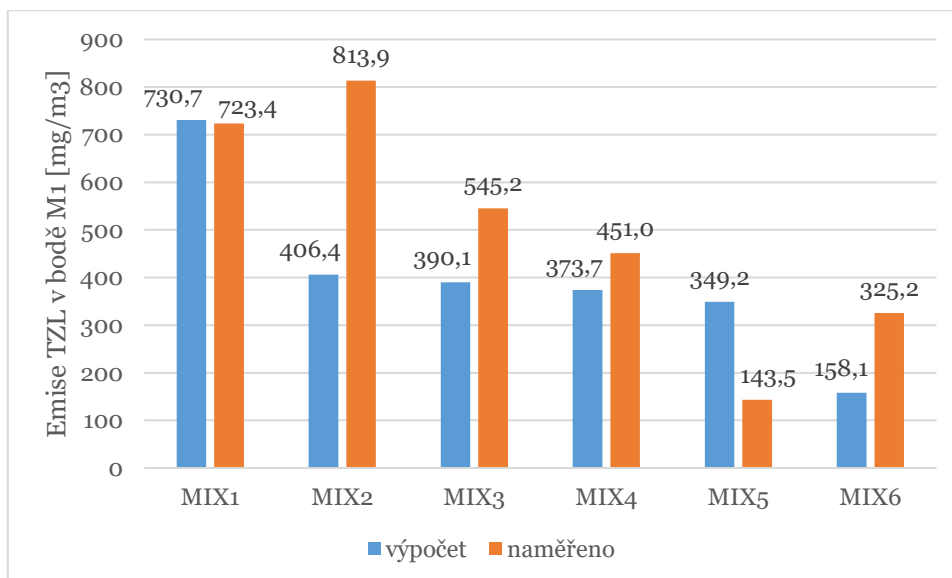
Obr. 63 Porovnání emisních hodnot SO₂ naměřených a odhadovaných na základě výpočtu

Tabulka Tab. 30 a Obr. 64 a Obr. 65 uvádí analýzu tvorby částic TZL v měřicím bodě M1 (před chladičem spalin) a M2 (za chladičem). Největší shody odhadovaných a reálně naměřených hodnot bylo dosaženo při spalování směsi MIX 1 v měřicím bodě M1. Je však zajímavé, že v měřicím bodě M2 již došlo k významnému nesouladu těchto dvou hodnot. Na základě této analýzy nelze stanovit žádná pravidla či popsat mechanismy, kde se odhadovaná tvorba TZL skutečně blíží k reálně naměřeným hodnotám. To je s největší pravděpodobností způsobeno rozdílnými provozními podmínkami, jakých bylo dosaženo v rotační peci.

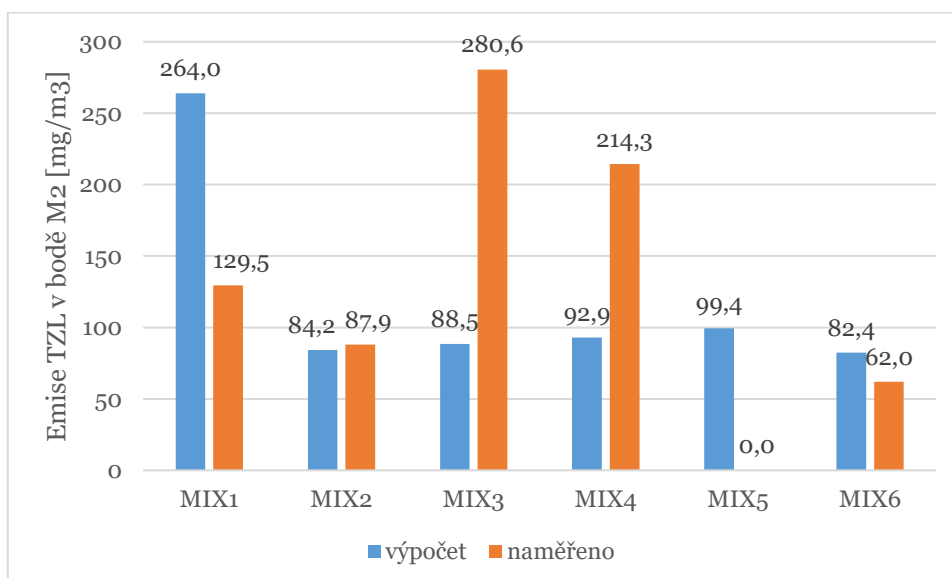
Tab. 30 Porovnání emisních hodnot TZL naměřených a odhadovaných na základě výpočtu v měřicím bodě 1 a 2

	emise TZL – měřicí bod M1				emise TZL – měřicí bod M2			
	odhad	změřeno	Δ	%	odhad	změřeno	Δ	%
MIX 1	730,7	723,4	-7,3	-1	264,0	129,5	-134,5	-51
MIX 2	406,4	813,9	407,5	100	84,2	87,9	3,7	4
MIX 3	390,1	545,2	155,1	40	88,5	280,6	192,1	217
MIX 4	373,7	451,0	77,3	21	92,9	214,3	121,4	131
MIX 5	349,2	143,5	-205,7	-59	99,4	-	-	-
MIX 6	158,1	325,2	167,1	106	82,4	62,0	-20,4	-25

U buněk označených „-“, měření neproběhlo



Obr. 64 Porovnání emisních hodnot TZL naměřených a odhadovaných na základě výpočtu v měřicím bodě M1



Obr. 65 Porovnání emisních hodnot TZL naměřených a odhadovaných na základě výpočtu v měřicím bodě M2

Nulová výzkumná hypotéza ve znění: „Složení tuhého paliva nemá vliv na tvorbu znečišťujících látek při jeho spalování v rotační peci“, může být na základě dosavadních výsledků vyvrácena. Přestože se odhad produkce emisí u palivových směsí (vytvořený ze znalosti emisí produkovaných při spalování dílčích paliv na základě pákového pravidla) 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 SO₂. Jakmile byl v palivové směsi ve větší míře zastoupen čistírenský kal se zvýšeným obsahem prchavé síry, jednoznačně docházelo k nárůstu produkce SO₂.

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 SO₂ byly nižší, než jak bylo odhadováno na základě spalovacích zkoušek jejich dílčích složek.

7 Komplexní vyhodnocení a doporučení do praxe

Experimentální část práce proběhla v poloprovozní rotační peci na půdě ÚPI FSI VUT v Brně. Experimentální část práce zahrnovala spalovací zkoušky 6 paliv a 6 palivových směsí.

Spalovací zkoušky jsou extrémně nákladné. Jeden den takovýchto zkoušek vychází na přibližně 100 000,- Kč. Z tohoto důvodu byla provedena vždy jedna zkouška pro samostatné palivo a jedna zkouška pro palivovou směs. Z tohoto důvodu je vypovídající schopnost provedených zkoušek 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 NO₂, druhou nejnižší tvorbu SO₂ 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 NO₂, případně SO₂ 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 SO₂. 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.

Zajímavé výsledky přinesla analýza toků těžkých kovů (TK), zejména analýza jejich tendence ke koncentraci do popelu či popílku. Zatímco TK v lesním odpadu měly výraznou tendenci odcházet z rotační pece v popílku spolu se spalinami, TK v KAL 2 se koncentrovaly zejména do popelu. Nabízí se další výzkumná otázka, zda lze složením paliva ovlivnit toky TK do popelu/popílku. Motivací je možnost získat čistší popel ze spalování alternativních paliv a využít jej například v rostlinné výrobě.

V porovnání s relativně suchými palivy a směsmi (TAP 2, KAL 2 a směsi MIX 2 – 5) docházelo při manipulaci s MIX 1 a 6 k výrazně nižší prašnosti. Vysoká vlhkost lesního odpadu vedla ke snížení úletu prachových částic při manipulaci se zmíněnými palivovými směsmi.

Univerzální konstrukce poloprovozní 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) blížících 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 ztuhnout 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) Složení paliva má zcela zásadní vliv na tvorbu popelu a také jeho teplotu tavení. Pokud je spalovací zařízení konstruováno pro tzv. sypný režim (teplota popelu má být pod hodnotou jeho teploty tavení), může tvorba nápeků či roztavení popelu do tekutého stavu způsobit vážné provozní problémy. Teplotu tavení je nutné sledovat a na jejím základě upravit provozní podmínky. Na základě zjištěných poznatků z experimentální části této práce je doporučeno se **při spalování čistírenského kalu v rotační peci pohybovat na teplotách do 950 °C**. Při této teplotě je zaručen sypný režim. 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 po zchlazení pece mechanicky odstraněn.
- b) Stanovení teploty tavení u popelu z TAP je z důvodu rozdílného složení tohoto paliva problematické. Na základě několika palivových analýz a provozních zkušeností však lze s vysokou mírou pravděpodobnosti konstatovat, že teploty do 1100 °C jsou při spalování TAP dostatečné pro zachování sypného režimu. Teplota tavení popelu z odpadních pneumatik je však nižší (přibližně 950 °C). Proto je pro zachování sypného režimu zapotřebí výše uvedenou doporučenou hodnotu spalovacích teplot chápat jako orientační a sledovat reálné složení paliva. Různé palivové příměsi mohou zásadně ovlivnit teplotu tavení popelovin. Zároveň je nutné dodržet doporučený tepelný výkon pece, aby nedošlo k natavení popelu jako v případě spalovací zkoušky s KAL 1.
- c) 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 přídatný 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 přidávaný 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. Díky tomu lze najít palivové směsi, jejichž spalování i v konvenčních spalovacích zařízeních bude z provozního hlediska dlouhodobě udržitelné. 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.

- d) V rámci výpočtu tepelného výkonu pece bylo zjištěno, že doporučený rozsah minimálního a maximálního výkonu pece **100 – 200 kW/m³ 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 nedopal v popílku a extrémní tvorba emisí CO. To jednoznačně dokládá nedokonalé spalování a podchlazení pece.
- e) Přestože bylo při spalování hnědého uhlí dosaženo relativně vysokých spalovacích teplot, obecně lze konstatovat, že podmínky v rotační peci nebyly pro spalování tohoto paliva vhodné (nedopal v popelu byl téměř 90 hm. %). Mletí uhlí na menší frakci by sice vedlo k lepšímu vyhoření paliva, avšak lze předpokládat, že by významná část jemného uhelného prachu nedohořela a odletěla s proudem spalin (míra nedopalu v popílku by byla významná). Pro spalování hnědého uhlí jsou určeny zejména šachtové kotle, u kterých uhlí prohořívá intenzivně a pomaleji. Jako výchozí referenční palivo však hnědé uhlí posloužilo dobře. Výsledky jeho emisní tvorby bylo možné porovnat s alternativními palivy a jejich směsmi a získat tak dobrou představu o vlivu spalování těchto paliv.

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 **nejvíce vhodná 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).

Související aktivity

V této kapitole jsou shrnuty základní autorovy aktivity související s doktorským studiem a tématem dizertační práce.

Publikace

h-index: 1, citace 2, počet článků v databázi SCOPUS: 2 (v časopisech s impakt faktorem: 3.333 a 0.77)

2022

BOJANOVSKÝ, J.; MÁŠA, V.; HUDÁK, I.; SKRYJA, P.; HOPJAN, J. Rotary Kiln, a unit on the border of the process and energy industry – current state and perspectives. Sustainability, 2022. **Under review**. [IF: 4.089]

SKRYJA, P.; HUDÁK, I.; BOJANOVSKÝ, J.; JEGLA, Z.; KORČEK, L. Effects of Oxygen-Enhanced Combustion Methods on Combustion Characteristics of Non-Premixed Swirling Flames. ENERGIES, 2022, vol. 15, no. 6, p. 1-21. ISSN: 1996-1073. [IF: 3.333]

2021

HUDÁK, I.; SKRYJA, P.; BOJANOVSKÝ, J.; JEGLA, Z.; KRŇÁVEK, M. The Effect of Inert Fuel Compounds on Flame Characteristics. ENERGIES, 2021, vol. 15, no. 1, p. 1-18. ISSN: 1996-1073. [IF: 3.333]

ILIUSHCHENKO, V.; BÍLEK, V.; KALINA, L.; HRUBÝ, P.; OPRAVIL, T.; BOJANOVSKÝ, J. Effect of alkali cation type on the plasticizing effect of ligno-sulfonate in alkali-activated systems. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol: IOP Publishing, 2021. p. 1-7. ISSN: 1757-8981.

2020

BOJANOVSKÝ, J.; KOTRLA, J.; SKRYJA, P.; HUDÁK, I. Bělení metametakaolinu v poloprovozních podmínkách v rotační peci. Mezinárodní Masarykova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky. Hradec Králové: Akademické sdružení MAGNANIMITAS Assn., 2020. s. 1090-1095. ISBN: 978-80-87952-33-7.

KOTRLA, J.; BOJANOVSKÝ, J.; OPRAVIL, T.; HRUBÝ, P. Preparation of metakaolin with high whiteness. Studentská odborná konference - CHEMIE JE ŽIVOT - sborník abstraktů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Purkyňova 464/118, Brno 612 00, 2020. p. 88-89. ISBN: 978-80-214-5920-0.

2019

BOJANOVSKÝ, J.; HUDÁK, I.; SKRYJA, P. The effect of Atomizing Media on the Flame Characteristics. Proceedings of the 9th European Combustion Meeting. Lisbon, Portugal: Instituto Superior Técnico, University of Lisboa, Portugal, 2019. s. 850-856.

HUDÁK, I.; SKRYJA, P.; BOJANOVSKÝ, J.; BRUMMER, V. Sewage sludge combustion in the rotary kiln. Proceedings of the 9th European Combustion Meeting.

Lisbon, Portugal: Instituto Superior Técnico, University of Lisboa, Portugal, 2019. s. 260-266.

SKRYJA, P.; ŠIMEČEK, R.; HUDÁK, I.; BOJANOVSKÝ, J. The influence of the combustion operation parameters in the process burners on the formation of NOX and heat fluxes. Lisbon, Portugal: Instituto Superior Técnico, University of Lisboa, Portugal, 2019. s. 1732-1738.

2018

BOJANOVSKÝ, J.; BĚLOHRADSKÝ, P.; SKRYJA, P.; HUDÁK, I. The Influence of Atomizing Media on the Quality of the Combustion of Liquid Fuels. Chemical Engineering Transactions, 2018, roč. 70, č. 1, s. 1483-1488. ISSN: 2283-9216. [IF: 0.77]

Zapojení do výzkumných projektů

Nízko-emisní výkonový hořák (TK04020213); 2022 – dosud;

Termická sanitace osiv jako ochrana před houbovými patogeny a škůdci (QK22010200); 2022 – dosud;

Implementace moderních přístupů při navrhování procesů a zařízení v procesním a energetickém průmyslu (FSI-S-20-6342); 2020 – 2022;

Využití kalcinovaných přírodních jílových surovin v portlandských cementech směsných (TJ04000383); 2020 – 2022;

Snížení nákladů na výrobu cementu využitím diatomitového separátu (FCH/FSI-J-21-7387); 2021

Příprava metakaolinu s vysokou bělostí (FCH/FSI-J-19-5917); 2019;

Vývoj teplovodního kotle a nízko-emisního hořáku (TK02020087); 2019 – 2022;

Konference

9th European Combustion Meeting. Lisbon, Portugal: Instituto Superior Técnico, University of Lisboa, Portugal, 2019

23rd International Congress of Chemical and Process Engineering. CHISA 2018 Prague

Patenty, užité vzory a funkční vzorky

Chlazený vysokoteplotní termočlánek (2022 – funkční vzorek 178043)

Poloprovozní jednotka teplovodního kotle a nízkoemisního hořáku (2022 – poloprovoz 177766)

Prototyp teplovodního kotle o maximálním výkonu 5,25 MW (2021 – prototyp 176650)

Prototyp nízkoemisního hořáku o maximálním výkonu 1,5 MW (2021 – prototyp 168352)

Prototyp nízkoemisního hořáku o maximálním výkonu 5,25 MW (2021 – prototyp 176222)

Hořáková tvarovka s vnitřní recirkulací spalin (2020 – patent 308978)

Olejový hořák s vnější atomizací kapalného paliva (2020 – patent 308898)

Vzduchová skříň s recirkulací spalin (2020 – patent 308899)

Technologický model pro stanovování okrajových podmínek (2020 – funkční vzorek 165361)

Rozprašovač kapalných paliv (2019 – užitný vzor 33583)

Plynová vestavba pro kombinovaný olejo-plynový automatický hořák (2019 – užitný vzor 33543)

Kombinovaný nízkoemisní hořák o maximálním výkonu 4,5 MW pro spalování nestandardizovaných plyných a kapalných paliv (2019 – prototyp 161402)

Hořáková hlava na nízko-výhřevná paliva (2017 – funkční vzorek 141074) – spoluautor

**u patentů a užitných vzorů jsou uvedena příslušná identifikační čísla. U ostatních výsledků jsou uvedena čísla VaVID*

Použitá literatura

- [1] HYŽÍK, Jaroslav. Spoluspalování tuhého alternativního paliva z mechanicko-biologické úpravy odpadů? Provozní zkušenosti říkají NE!: All for power: Rubrika: Spalovny [online]. 18. 10. 2017 [cit. 2020-8-28]. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/clanek/spoluspalovani-tuheho-alternativniho-paliva-z-mechanicko-biologicke-upravy-odpadu-provozni-zkusenosti-rikaji-ne/>.
- [2] ŠOMPLÁK, Radovan, Vlastimír NEVRLÝ, Veronika SMEJKALOVÁ, Zlata ŠMÍDOVÁ a Martin PAVLAS. Bulky waste for energy recovery: Analysis of spatial distribution. *Energy* [online]. 2019, **181**, 827–839. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2019.05.175
- [3] PLUSKAL, Jaroslav, Radovan ŠOMPLÁK, Dušan HRABEC, Vlastimír NEVRLÝ a Lars Magnus HVATTUM. Optimal location and operation of waste-to-energy plants when future waste composition is uncertain. *Operational Research* [online]. 2022 [vid. 2022-08-24]. ISSN 1866-1505. Dostupné z: doi:10.1007/s12351-022-00718-w
- [4] NIELSEN, A. R., LARSEN, M. B., DAM-JOHANSEN, K., & GLARBORG, P. (2012). *Combustion of large solid fuels in cement rotary kilns*. Technical University of Denmark, Department of Chemical Engineering.
- [5] REHFELDT, M., E. WORRELL, W. EICHHAMMER a T. FLEITER. 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
- [6] MAKARICHI, Luke, Warangkana JUTIDAMRONGPHAN a Kua-anan TECHATO. 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
- [7] LOMBARDI, Lidia, Ennio CARNEVALE a Andrea CORTI. 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
- [8] KRÁSA, Ondřej. Základem byla silná legislativa, říkají na jihu Švédska. Odpady. Česká republika: *Economia*, 2015, XXV(1), str. 11-12. ISSN 1210-4922 MK ČR 6330.
- [9] KALOGIROU, Soteris A. Artificial intelligence for the modeling and control of combustion processes: a review. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 2003, **29**(6), 515–566. ISSN 0360-1285. Dostupné z: doi:10.1016/S0360-1285(03)00058-3
- [10] WANG, Meiqi, Enli CHEN, Pengfei LIU a Wenwu GUO. Multivariable nonlinear predictive control of a clinker sintering system at different working states by

- combining artificial neural network and autoregressive exogenous. *Advances in Mechanical Engineering* [online]. 2020, **12**(1), 168781401989650. ISSN 1687-8140, 1687-8140. Dostupné z: doi:10.1177/1687814019896509
- [11] LI, Tao, Zhenting ZHANG a Hua CHEN. Predicting the combustion state of rotary kilns using a Convolutional Recurrent Neural Network. *Journal of Process Control* [online]. 2019, **84**, 207–214. ISSN 0959-1524. Dostupné z: doi:10.1016/j.jprocont.2019.10.009
- [12] FINNIE, G. J., N. P. KRUYT, M. YE, C. ZEILSTRA a J. A. M. KUIPERS. Longitudinal and transverse mixing in rotary kilns: A discrete element method approach. *Chemical Engineering Science* [online]. 2005, **60**(15), 4083–4091. ISSN 0009-2509. Dostupné z: doi:10.1016/j.ces.2004.12.048
- [13] Analýza přechodu komunálního odpadu (skupina 20 Katalogu odpadů) na palivo z odpadu [online]. V: .Ministerstvo životního prostředí, 2015 [cit. 2020-08-15]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002FoDC7/cz/projekty_po8_opzp_2007_2013/\\$FILE/OODP-4_6_MZP_FIN-20160810.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002FoDC7/cz/projekty_po8_opzp_2007_2013/$FILE/OODP-4_6_MZP_FIN-20160810.pdf).
- [14] HOPJAN, Josef. Využití tuhých alternativních paliv pro výpal cementářského slinku a vápna v ČR: Technická zpráva. Srpen 2015. Česká republika.
- [15] ŠŤASTNÁ, Jarmila. Výrobci TAP potřebují stabilní odběratele. In: Agroweb, ProfiPres Vydavatelství odborných časopisů: Odpady [online]. 18. 3. 2014 [cit. 2020-08-28]. Dostupné z: <https://www.odpady-online.cz/vyrobci-tap-potrebuji-stabilni-odberatele/>.
- [16] ISHAK, Siti Aktar a Haslenda HASHIM. Low carbon measures for cement plant – a review. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2015, **103**, Carbon Emissions Reduction: Policies, Technologies, Monitoring, Assessment and Modeling, 260–274. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2014.11.003
- [17] RAHMAN, Azad, M.G. RASUL, M.M.K. KHAN a S. SHARMA. Impact of Alternative Fuels on the Cement Manufacturing Plant Performance: An Overview. *Procedia Engineering* [online]. 2013, **56**, 393–400. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2013.03.138
- [18] VERMEULEN, I., J. VAN CANEGHEM, C. BLOCK, J. BAEYENS a C. VANDECASTEELE. Automotive shredder residue (ASR): Reviewing its production from end-of-life vehicles (ELVs) and its recycling, energy or chemicals' valorisation. *Journal of Hazardous Materials* [online]. 2011, **190**(1), 8–27. ISSN 0304-3894. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhazmat.2011.02.088
- [19] LEMIEUX, Paul, Eric STEWART, Matthew REALFF a James A MULHOLLAND. Emissions study of co-firing waste carpet in a rotary kiln. *Journal of Environmental Management* [online]. 2004, **70**(1), 27–33. ISSN 0301-4797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvman.2003.10.002
- [20] ARIYARATNE, W.K.H., M.C. MELAAEN, K. EINE a L.A. TOKHEIM. Meat and bone meal as a renewable energy source in cement kilns: investigation of

- optimum feeding rate. *Renewable Energy and Power Quality Journal* [online]. 2011, 1244–1249. ISSN 2172038X, 2172038X. Dostupné z: doi:10.24084/repqj09.609
- [21] CAMPUZANO, Felipe, Robert C. BROWN a Juan Daniel MARTÍNEZ. Auger reactors for pyrolysis of biomass and wastes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2019, **102**, 372–409. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2018.12.014
- [22] MALKOW, Thomas. Novel and innovative pyrolysis and gasification technologies for energy efficient and environmentally sound MSW disposal. *Waste Management* [online]. 2004, **24**(1), 53–79. ISSN 0956-053X. Dostupné z: doi:10.1016/S0956-053X(03)00038-2
- [23] CZAJCZYŃSKA, D., L. ANGUILANO, H. GHAZAL, R. KRZYŻYŃSKA, A. J. REYNOLDS, N. SPENCER a H. JOUHARA. Potential of pyrolysis processes in the waste management sector. *Thermal Science and Engineering Progress* [online]. 2017, **3**, 171–197. ISSN 2451-9049. Dostupné z: doi:10.1016/j.tsep.2017.06.003
- [24] CHEN, Dezhen, Lijie YIN, Huan WANG a Pinjing HE. Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. *Waste Management* [online]. 2014, **34**(12), 2466–2486. ISSN 0956-053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2014.08.004
- [25] LI, A. M, X. D LI, S. Q LI, Y REN, N SHANG, Y CHI, J. H YAN a K. F CEN. Experimental studies on municipal solid waste pyrolysis in a laboratory-scale rotary kiln. *Energy* [online]. 1999, **24**(3), 209–218. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:10.1016/S0360-5442(98)00095-4
- [26] PROMDEE, Kittiphop, Jirawat CHANVIDHWATANAKIT, Somruedee SATITKUNE, Chakkrich BOONMEE, Thitipong KAWICHAJ, Sittipong JARERNPRASERT a Tharapong VITIDSANT. Characterization of carbon materials and differences from activated carbon particle (ACP) and coal briquettes product (CBP) derived from coconut shell via rotary kiln. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2017, **75**, 1175–1186. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2016.11.099
- [27] DUKU, Moses Hensley, Sai GU a Essel Ben HAGAN. Biochar production potential in Ghana—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2011, **15**(8), 3539–3551. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2011.05.010
- [28] REN, Jie, Yi-Ling LIU, Xiao-Yan ZHAO a Jing-Pei CAO. Methanation of syngas from biomass gasification: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2020, **45**(7), 4223–4243. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2019.12.023
- [29] MONLAU, F., C. SAMBUSITI, N. ANTONIOU, A. BARAKAT a A. ZABANIOTOU. A new concept for enhancing energy recovery from agricultural residues by coupling anaerobic digestion and pyrolysis process. *Applied Energy* [online]. 2015, **148**, 32–38. ISSN 0306-2619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2015.03.024

- [30] GRASSMANN, Hans, Marta BOARO, Marco CITOSI, Marina COBAL, Enrico ERSETTIS, Elvis KAPLLAJ a Andrea PIZZARIELLO. Solar Biomass Pyrolysis with the Linear Mirror II. *Smart Grid and Renewable Energy* [online]. 2015, **06**(07), 179–186. ISSN 2151-481X, 2151-4844. Dostupné z: doi:10.4236/sgre.2015.67016
- [31] ALONSO, E., A. GALLO, M. I. ROLDÁN, C. A. PÉREZ-RÁBAGO a E. FUENTEALBA. Use of rotary kilns for solar thermal applications: Review of developed studies and analysis of their potential. *Solar Energy* [online]. 2017, **144**, 90–104. ISSN 0038-092X. Dostupné z: doi:10.1016/j.solener.2017.01.004
- [32] LEBLANC RJ et al. Global atlas of excreta, wastewater sludge, and biosolids management: moving forward the sustainable and welcome uses of a global resource. United Nations Human Settlements Programme; 2009.
- [33] NAAMANE, Sara, Zakia RAIS a Mustapha TALEB. The effectiveness of the incineration of sewage sludge on the evolution of physicochemical and mechanical properties of Portland cement. *Construction and Building Materials* [online]. 2016, **112**, 783–789. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.121
- [34] WERTHER, J. a T. OGADA. Sewage sludge combustion. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 1999, **25**(1), 55–116. ISSN 0360-1285. Dostupné z: doi:10.1016/S0360-1285(98)00020-3
- [35] SCHNELL, Matthias, Thomas HORST a Peter QUICKER. Thermal treatment of sewage sludge in Germany: A review. *Journal of Environmental Management* [online]. 2020, **263**, 110367. ISSN 0301-4797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvman.2020.110367
- [36] PODEDWORNA J, UMIEJEWSKA K. The technology of sludge. Warsaw: The Warsaw University of Technology; 2008.
- [37] WERLE, Sebastian a Ryszard K. WILK. A review of methods for the thermal utilization of sewage sludge: The Polish perspective. *Renewable Energy* [online]. 2010, **35**(9), 1914–1919. ISSN 0960-1481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2010.01.019
- [38] HORSLEY, Coleman, Marion H. EMMERT a Aaron SAKULICH. Influence of alternative fuels on trace element content of ordinary portland cement. *Fuel* [online]. 2016, **184**, 481–489. ISSN 0016-2361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2016.07.038
- [39] GIKAS, Petros. Towards energy positive wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management* [online]. 2017, **203**, Waste Management with emphasis on municipal waste, biowaste and industrial waste, 621–629. ISSN 0301-4797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvman.2016.05.061
- [40] COHEN, Yariv. Phosphorus dissolution from ash of incinerated sewage sludge and animal carcasses using sulphuric acid. *Environmental Technology* [online]. 2009, **30**(11), 1215–1226. ISSN 0959-3330. Dostupné z: doi:10.1080/09593330903213879

- [41] ASHDEC, 2008. Industrial Process and Pilot Plant. 2016. http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/ASH%20DEC%202008%20Industrial%20Process%20and%20Pilot%20Plant.pdf (Accessed: 01.09.2016).
- [42] SHEN, Lilly a Dong-Ke ZHANG. An experimental study of oil recovery from sewage sludge by low-temperature pyrolysis in a fluidised-bed☆. *Fuel* [online]. 2003, **82**(4), 465–472. ISSN 0016-2361. Dostupné z: doi:10.1016/S0016-2361(02)00294-6
- [43] SHEN, Lilly a Dong-ke ZHANG. Low-temperature pyrolysis of sewage sludge and putrescible garbage for fuel oil production. *Fuel* [online]. 2005, **84**(7), 809–815. ISSN 0016-2361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2004.11.024
- [44] LLOMPART, Maria, Lucia SANCHEZ-PRADO, J. PABLO LAMAS, Carmen GARCIA-JARES, Enrique ROCA a Thierry DAGNAC. Hazardous organic chemicals in rubber recycled tire playgrounds and pavers. *Chemosphere* [online]. 2013, **90**(2), 423–431. ISSN 0045-6535. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2012.07.053
- [45] ANTONIOU, N., G. STAVROPOULOS a A. ZABANIOTOU. Activation of end of life tyres pyrolytic char for enhancing viability of pyrolysis – Critical review, analysis and recommendations for a hybrid dual system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2014, **39**, 1053–1073. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2014.07.143
- [46] LAMAS, Wendell de Queiroz, Jose Carlos Fortes PALAU a Jose Rubens de CAMARGO. Waste materials co-processing in cement industry: Ecological efficiency of waste reuse. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2013, **19**, 200–207. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2012.11.015
- [47] MACHIN, Einara Blanco, Daniel Travieso PEDROSO a João Andrade DE CARVALHO. Energetic valorization of waste tires. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2017, **68**, 306–315. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2016.09.110
- [48] DÍEZ, C., M. E. SÁNCHEZ, P. HAXAIRE, O. MARTÍNEZ a A. MORÁN. Pyrolysis of tyres: A comparison of the results from a fixed-bed laboratory reactor and a pilot plant (rotatory reactor). *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [online]. 2005, **74**(1), Pyrolysis 2004, 254–258. ISSN 0165-2370. Dostupné z: doi:10.1016/j.jaap.2004.11.024
- [49] LI, S.-Q., Q. YAO, Y. CHI, J.-H. YAN a K.-F. CEN. Pilot-Scale Pyrolysis of Scrap Tires in a Continuous Rotary Kiln Reactor. *Industrial & Engineering Chemistry Research* [online]. 2004, **43**(17), 5133–5145. ISSN 0888-5885. Dostupné z: doi:10.1021/ie030115m
- [50] KUMARAVEL, S. T., A. MURUGESAN a A. KUMARAVEL. Tyre pyrolysis oil as an alternative fuel for diesel engines – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2016, **60**, 1678–1685. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2016.03.035

- [51] HUBER, Florian, Dominik BLASENBAUER, Ole MALLOW, Jakob LEDERER, Franz WINTER a Johann FELLNER. Thermal co-treatment of combustible hazardous waste and waste incineration fly ash in a rotary kiln. *Waste Management* [online]. 2016, **58**, 181–190. ISSN 0956-053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2016.09.013
- [52] ČSN EN ISO 21637: Tuhá alternativní paliva - Terminologie, definice a popis. Česká verze evropské normy EN ISO 21637:2020, 2022.
- [53] Česko, Vyhláška č. 415/2012 Sb. ze dne 14.8.2002, Nařízení vlády, kterým se stanoví emisní limity a další podmínky pro spalování odpadu, Sbírka zákonů, částka 127/2002, s. 5226-5332.
- [54] AVELIZAPA, Norma Gabriela Rojas. (2019). *Biotechnology for Treatment of Wastes Containing Metals*. River Publishers. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpBTRWCMoA/biotechnology-treatment/biotechnology-treatment> [online]. [vid. 2022-08-29]. Dostupné z: <https://app.knovel.com/kn/resources/kpBTRWCMoA/toc>
- [55] ZARE, Ehsan Nazarzadeh, Ahmad MOTAHARI a Mika SILLANPÄÄ. Nanoadsorbents based on conducting polymer nanocomposites with main focus on polyaniline and its derivatives for removal of heavy metal ions/dyes: A review. *Environmental Research* [online]. 2018, **162**, 173–195. ISSN 0013-9351. Dostupné z: doi:10.1016/j.envres.2017.12.025
- [56] KABATA-PENDIAS, Alina. *Kabata-Pendias, A. (2000). Trace Elements in Soils and Plants (3rd ed.)*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420039900> [online]. 3. vyd. Boca Raton: CRC Press, 2000. ISBN 978-0-429-19112-1. Dostupné z: doi:10.1201/9781420039900
- [57] LU, Kouping, Xing YANG, Gerty GIELEN, Nanthi BOLAN, Yong Sik OK, Nabeel Khan NIAZI, Song XU, Guodong YUAN, Xin CHEN, Xiaokai ZHANG, Dan LIU, Zhaoliang SONG, Xingyuan LIU a Hailong WANG. Effect of bamboo and rice straw biochars on the mobility and redistribution of heavy metals (Cd, Cu, Pb and Zn) in contaminated soil. *Journal of Environmental Management* [online]. 2017, **186**, Biogeochemistry of trace elements in the environment, 285–292. ISSN 0301-4797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvman.2016.05.068
- [58] ČESKÁ REPUBLIKA. Vyhláška o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady. In: Sbírka zákonů. Česká republika: Ministerstvo životního prostředí ČR, 2005, ročník 2005, 105/2005 Sb., číslo 294.
- [59] HAVELKA, Petr. Odpady se v ČR využívají stále více - STATISTIKA ENERGETICKÉHO VYUŽÍVÁNÍ ODPADŮ A ALTERNATIVNÍCH PALIV: Aktuality [online]. 17.06.2018 [cit. 2020-08-02]. Dostupné z: <http://www.caoh.cz/odborne-clanky-a-aktuality/odpady-se-v-cr-vyuzivaji-stale-vice-statistika-energetickeho-vyuzivani-odpadu-a-alternativnich-paliv.html>.
- [60] Kde končí ostravský odpad? Téměř polovina se znovu využije. In: Moravskoslezský deník.cz [online]. 14.05.2018 [cit. 2020-08-14]. Dostupné z:

- https://moravskoslezsky.denik.cz/zpravy_region/kde-konci-ostravsky-odpad-temer-polovina-se-znovu-vyuzije-20180513.html.
- [61] Mariuspedersen.cz [online]. Česká republika [cit. 2020-08-03]. Dostupné z: <https://www.mariuspedersen.cz/cs/o-marius-pedersen/sluzby/21.shtml>.
- [62] Nová technologie ve výrobě TAP Brno. Odpady. Česká republika: *Economia*, 2016, XXVI(10), str. 8. ISSN 1210-4922 MK ČR 6330.
- [63] INVESTprojekt NNC, s.r.o. Rozšíření palivové základny cementárny Cement Hranice, Oznámení záměru. Brno, 2007.
- [64] KOLÁŘOVÁ, M., J. MAZANCOVÁ, P. JEVIČ a P. HUTLA. Tuhé alternativní palivo s biomasou. In: *Zemědělská technika a biomasa 2007* [online]. Česká republika, 2007, str. 1 - 6 [cit. 2020-08-24]. Dostupné z: <http://www.vuzt.cz/svt/vuzt/publ/P2007/022.PDF>.
- [65] Seznam spaloven odpadů v ČR. In: Český hydrometeorologický ústav [online]. Česká republika, 14.1.2020 [cit. 2020-08-17]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/oez/emise/spalovny/index.html>.
- [66] Veolia postaví v Karviné první multipalivový kotel v ČR. Odpady. Česká republika: *Economia*, 2018, XXVIII(7), str. 14-15. ISSN 1210-4922 MK ČR 6330.
- [67] Teplárna Přerov a palivo z odpadů. Odpady. Česká republika: *Economia*, 2018, XXVIII(11), str. 7. ISSN 1210-4922 MK ČR 6330.
- [68] ŠŤASTNÁ, Jarmila. Klíčový je obsah chlóru v palivu. Odpady. *Economia*, 2012, XXII(07-08), str.10. ISSN 1210-4922 MK ČR 6330.
- [69] 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.
- [70] BAŘTIPÁN, Václav. 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>.
- [71] BRENNER, Otakar a Josef CIZNER. 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>.
- [72] FERNANDO R. Cofiring high ratios of biomass with coal. 2012.
- [73] JAAP KOPPEJAN, KAY SCHAUBACH, JANET WITT, a DANIELA THRÄN. Production of Solid Sustainable Energy Carriers from Biomass by Means of Torrefaction. *Torrefaction Technology and Strategy Report*. 2015, **No. D10.2**, 43.

- [74] SAMI, M., K. ANNAMALAI a M. WOOLDRIDGE. 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
- [75] JAKUBES, Jaroslav: Spoluspalování biomasy s fosilními palivy – od výzkumu k praktickému využití. *Biom.cz* [online]. 2010-10-20 [cit. 2020-08-24]. Dostupné z WWW: <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/spoluspalovani-biomasy-s-fosilnimi-palivy-od-vyzkumu-k-praktickemu-vyuziti>>. ISSN: 1801-2655.
- [76] MCKENDRY, Peter. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresource Technology* [online]. 2002, **83**(1), Reviews Issue, 47–54. ISSN 0960-8524. Dostupné z: doi:10.1016/S0960-8524(01)00119-5
- [77] KIEL JHA, VERHOEFF F, GERHAUSE H, MEULEMANN B. BO₂-technology for biomass upgrading into solid fuel. 2008.
- [78] ESTEŘÁK, O. Doprava strusky ze spalovací pece. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2016. 92 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Františku Volkovi, CSc.
- [79] KUBESA, Petr, Jiří HORÁK, Kamil KRPEC, František HOPAN, Zuzana JANKOVSKÁ a Lubomír MARTINÍK. Emise prachu z malých spalovacích zařízení na tuhá paliva a metody jejich stanovení. *Tzb-info* [online]. 2013, 4.2.2013 [cit. 2020-09-09]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/9536-emise-prachu-z-malych-spalovacich-zarizeni-na-tuha-paliva-a-metody-jejich-stanoveni>.
- [80] KRPEC, Kamil, Jiří HORÁK a František HOPAN. Měření emisí znečišťujících látek z kotlů malých výkonů. *Tzb-info* [online]. 2012, 16.1.2012 [cit. 2020-08-13]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/8200-mereni-emisi-znecistujicich-latek-z-kotlu-malych-vykonu>.
- [81] SHIEHNEJADHESAR, Ali, Robert SCHARLER, Ramin MEHRABIAN a Ingwald OBERNBERGER. Development and validation of CFD models for gas phase reactions in biomass grate furnaces considering gas streak formation above the packed bed. *Fuel Processing Technology* [online]. 2015, **139**, 142–158. ISSN 0378-3820. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuproc.2015.07.029
- [82] CHAPELA, S., J. PORTEIRO, M. A. GÓMEZ, D. PATIÑO a J. L. MÍGUEZ. Comprehensive CFD modeling of the ash deposition in a biomass packed bed burner. *Fuel* [online]. 2018, **234**, 1099–1122. ISSN 0016-2361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2018.07.121
- [83] XIA, Zihong, Peng SHAN, Caixia CHEN, Hailiang DU, Jie HUANG a Li BAI. A two-fluid model simulation of an industrial moving grate waste incinerator. *Waste Management* [online]. 2020, **104**, 183–191. ISSN 0956-053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2020.01.016
- [84] STROUHAL, Jirí, Tomáš JURENA a Zdenek JEGLA. Fouling Simulations of a Passive Part of the Testing Combustion Facility. *Chemical Engineering Transactions* [online]. 2021, **88**, 625–630. ISSN 2283-9216. Dostupné z: doi:10.3303/CET2188104

[85] Ing. Vladimír Kopecký, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství, osobní konzultace.

Seznam zkratek

CFD	Computational Fluid Dynamics
ČK	čistírenský kal
ČR	Česká republika
ČSN	české technické normy
DEM	Discrete Element Method
ES	evropské společenství
EVO	energetické využití odpadu
FSI	Fakulta strojního inženýrství
LO	lesní odpad
RP	rotační pec
TAP	tuhé alternativní palivo
TČ	termočlánek
TK	těžký kov
TOC	celkový organický uhlík
ÚPI	Ústav procesního inženýrství
VUT	Vysoké učení technické v Brně
ZEVO	zařízení pro energetické využití odpadu