

# Vliv zanášivých vlastností popílku na návrh ohniště kotle pro zařízení na energetické využití neušlechtilých paliv na bázi spalitelného odpadu a biomasy

Jan ZABLOUDIL<sup>a</sup>, Zdeněk JEGLA<sup>a</sup>, Petr SKÁLA<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství, Technická 2, 616 69 Brno, Česká republika  
e-mail: [191771@vutbr.cz](mailto:191771@vutbr.cz) (Jan Zabloudil)

<sup>b</sup> EVECO Brno, s.r.o., Hudcova 660/76d, 612 00 Brno, Česká republika

## Souhrn

Článek se zabývá potřebou aktualizace empirických parametrů používaných při návrhu kotlových ohnišť v souvislosti s přechodem od spalování ušlechtilého uhlí k palivům nižší kvality, jako jsou odpady a biomasa. Zaměřuje se na vliv tří parametrů souvisejících s vlastnostmi úletového popílku a jeho zanášivostí v rámci tzv. Gurvičovy metody výpočtu ohniště. Základní citlivostní studie byla provedena na reálném referenčním zařízení porovnáním výsledků tepelných výpočtů s naměřenými výstupními teplotami spalin při různých ustálených provozních stavech. Výsledky ukázaly, že zejména úprava empirického parametru zanesení stěn ohniště ( $\xi$ ) výrazně zlepšuje shodu mezi výpočtem a měřením. Součástí práce je také představení nově vyvinutého testovacího zařízení pro hodnocení zanášivosti popílku, zejména pro návrh navazujících konvekčních sekcí, ověřeného pro biomasová paliva.

**Klíčová slova:** zařízení pro energetické využití odpadu, roštové spalování odpadu, roštové spalování biomasy, návrh ohniště, jízková teplota, pevná odpadní paliva, popílkové a částicové zanášení

## Obsah

1. Úvod
  - 1.1. Kotle decentralizovaných zdrojů tepla
  - 1.2. Návrh ohniště kotle
2. Studie vlivu parametrů zanášení
  - 2.1. Metodika
  - 2.2. Výsledky a diskuse
3. Aparatura pro zjišťování zanášivosti spalin a dalších horkých proudů
4. Závěr

## 1. Úvod

V posledních desetiletích je z ekonomických a environmentálních důvodů patrný posun ve složení palivové základny v energetice. Poptávka po teple a elektřině roste společně s populací a objemem průmyslové výroby. V mnoha částech světa, zejména v Evropě, začínají docházet ložiska vysoce ušlechtilých uhlí o velkém energetickém obsahu, což výrazně zvyšuje cenu topného uhlí. Zároveň je zvyšován tlak na snížení environmentální zátěže ustoupením od spalování fosilních paliv. Na významu tak získávají různé energetické mixy na bázi biomasy a spalitelných odpadů<sup>1,2</sup>. Tato nová, neušlechtilá paliva se vyznačují značně proměnlivými charakteristikami jako je výhřevnost, podíl popeloviny, nebo velikost částic, což vede k vysoké vhodnosti jejich spalování v roštových ohništích<sup>3,4</sup>.

Výhodou roštového spalování nad fluidními kotli je pro tento typ paliv také možnost velké variability palivových směsí, které je možné spalovat v jednom konkrétním zařízení. Pro srovnání, alternativně užívané fluidní kotle naproti tomu vyžadují důkladnou předpřípravu paliva jednoho daného druhu a jejich účinnost může velmi výrazně kolísat se změnou rozměrů a hustoty částic paliva.

Zaměříme-li se blíže na rozmach získávání energií z neušlechtilých paliv, je vhodné zároveň zmiňovat další z výrazných trendů dnešní energetiky, kterým je decentralizace a stavba menších zařízení o nižších tepelných příkonech (jednotky až desítky MW), zajišťujících tepelné potřeby obcí či podniků. Teplárenské kotelny, ve velkém množství případů s kogenerací tepla a elektřiny, užívající jako palivo štěpku a zbytky z těžby dřeva z lokálních lesů, či nerecyklovatelný výhřevný zbytek z úpravy komunálního odpadu z obce či menšího svazku obcí, v kapacitách spadajících do diskutovaného intervalu jsou na vzestupu. U paliv na bázi dřevní a travní biomasy je pak mimo finanční stránku věcí hlavním hnacím faktorem nízká bilance uhlíkové stopy, u spalitelných komunálních a dalších odpadů je jím pak zejména snaha omezit skládkování výhřevných odpadů, které není možné snadno materiálově znovu využít<sup>5</sup>.

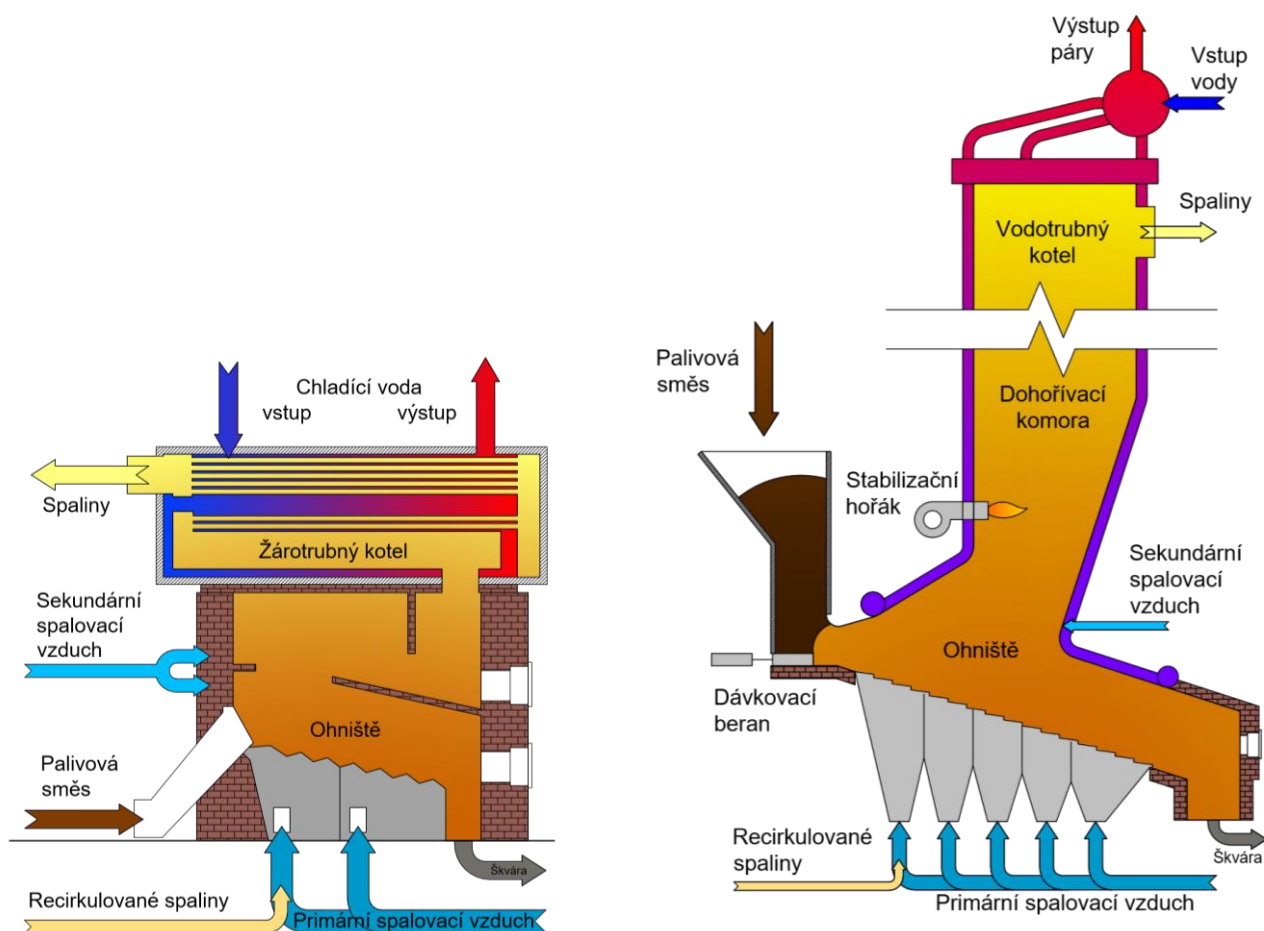
Je záměrné, že je tento článek věnován oběma výše zmíněným skupinám paliv, neboť provozní zkušenosti ze současných kotelem ukazují vhodnost roštových spalovacích zařízení obdobné konstrukce jak pro paliva na bázi biomasy, tak pro spalitelné odpady – není pak výjimkou, když je jedno teplárenské zařízení provozováno s kotlem na směs obou těchto složek. Jako příklady, potvrzující aktuálnost tohoto tvrzení, lze z českého prostředí zmínit například momentálně budovanou teplárenskou kotelnu v Plané nad Lužnicí o projektované zpracovatelské kapacitě 80 kt palivové směsi ročně<sup>6</sup>, nebo připravovanou kotelnu v Třebíčské severní teplárně o kapacitě 20 kt/rok<sup>7</sup>. V obou případech budou kotelny osazeny roštovými kotli na palivovou směs odpadu a biomasy. Pro zjednodušení terminologie budou v tomto článku dále všechna teplárenská zařízení na směsná pevná paliva odpadního a odpado-biomasového charakteru označována jako ZEVO (*Zařízení pro Energetické Využití Odpadu*), je však nutné zde prvně zmínit existenci určitých rozdílů mezi zařízeními spalujícími čistě odpad a zařízeními spalujícími jeho směs s biomasou. Zejména se jedná o legislativně závazné požadavky na emisní limity, v českém prostředí upravené vyhláškou 415/2012 Sb.<sup>10</sup> a které jsou pro kotle na odpady obecně přísnější než pro kotle na biomasu. Pro zařízení na spoluspalování palivových směsí jsou pak emisní limity vypočteny podle vážených hodnot specifických emisních limitů pro složky směsi paliv. S emisními limity jsou u spalování odpadů spojena primární opatření pro snižování produkce emisí, zejména oxidů dusíku a dioxinů, v podobě předepsané zádržné teploty spalin před první konvekční teplosměnnou plochou. Velikost této zádržné teploty se odvíjí od zastoupení chloru v hořlavině paliva a v praxi tak přes reálný objem spalin ovlivňuje jak velikost dohořívacího traktu ohniště, tak možnosti spoluspalování s biomasou z důvodů nevhodných teplot měknutí popílku<sup>8</sup>.

Proto je tento článek zaměřen na problematiku standardního návrhového výpočtu tradičně užívaného při projektování kotlových ohnišť a na diskusi vlivu výše popsaných aktuálních trendů v oblasti palivových mixů na jeho vhodnost a přesnost.

## 1.1. Kotle decentralizovaných zdrojů tepla

Zásadním rozdílem mezi velkými teplárenskými kotli na neušlechtilá pevná paliva a kotli navrhovanými pro menší, lokální teplárenské provozy na tytéž palivové směsi, je převládající konstrukce (viz obrázek 1).

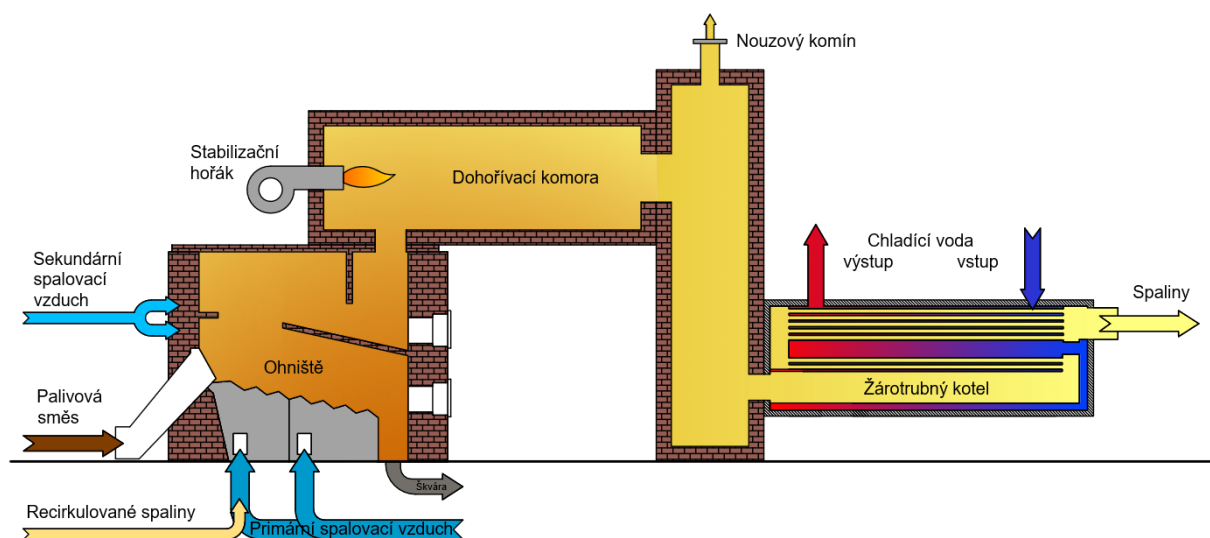
Kotle v centralizovaných ZEVO jsou zpravidla koncipovány jako roštový vodotrubný kotel tak, že obálku prostoru ohniště tvoří vodou chlazené membránové stěny<sup>8</sup> (viz obrázek 1, vpravo). Tato koncepce umožňuje provoz při vysokých tlacích a teplotách páry, což sice vede k vyšší dosažitelné termické účinnosti systému, nicméně má dostatečnou návratnost pouze u velkých, investičně náročných zařízení. Je proto vhodná pro energetické využití odpadu ve velkém měřítku. Typická kapacita těchto zařízení se pohybuje od desítek do stovek MW tepelného výkonu, přičemž elektrický výkon takového ZEVO bývá řádově jednotky až desítky MWe.



**Obrázek 1: Charakteristické řezy roštovými spalovacími komorami – žárotrubného kotle na biomasový odpad (vlevo), standardního u jednotek nižších tepelných příkonů – a vodotrubného kotle (vpravo), standardního u velkých jednotek**

U menších kotlů je pak ekonomicky výhodnější držet se na nižších parametrech páry, případně jen horké vody a vhodné tak jsou spíše žárotrubné kotle s nechlazeným ohništěm (viz obrázek 1, vlevo). Primární spalovací komora je zde prostorově oddělena od hlavního vodního objemu kotle, který buď chladí sekundární - tzv. dohořivací - komoru ve formě prvního tahu žárotrubného kotle (u biomasy), nebo je žárotrubný kotel osazen až za vyzdívkanou, nechlazenou dohořivací komoru<sup>22</sup>.

Druhé zmíněné řešení je typické pro malá ohniště na odpad, kdy nechlazená dohořivací komora umožňuje lepší kontrolu zadržné doby a teploty spalin s ohledem na tvorbu plynných polutantů ve formě oxidů dusíku a dioxinů. Schematický řez tohoto provedení je znázorněn na obrázku 2 spolu s typickým prostorovým uspořádáním těchto zařízení a fotografií typického provedení roštového ohniště. Výkon těchto zařízení je obvykle řádově jednotky až nižší desítky MW tepelného výkonu. Z tohoto důvodu jsou žárotrubné roštové kotle využívány spíše v menších energetických zdrojích nebo průmyslových provozech. Tyto a další rozdíly mají vliv na vypovídající schopnost standardního návrhového výpočtu.



**Obrázek 2: Charakteristický řez roštovou spalovací komorou žárotrubného kotle v sestavě pro spalování pevného odpadu (nahore), typické prostorové uspořádání sestavy (vlevo dole), fotografie ohniště s roštem při odstávce (vpravo dole)**

## 1.2. Návrh ohniště kotle

Tradičně spočívá projekční výpočet ohniště zpravidla v semiempirickém výpočtu teploty produkovaných spalin, která musí odpovídat předem stanoveným parametrům. Interval požadovaných teplot pro dané ohniště je pak určen teplotou měknutí popílku pro dané palivo, konstrukcí navazujícího kotle a rosným bodem spalin pro dané palivo, teplotním intervalem přijatelné účinnosti pro případné osazené technologie čištění spalin, legislativními limity atd. Vzhledem ke komplexnímu vlivu geometrie spalovací komory na hledané výstupy, není při tomto standardním přístupu možné odvodit vzorce pro přímý výpočet rozměrů ohniště. Při zpracovávání nového projektu se tak výpočty provádí kontrolním způsobem na vybraném konstrukčním řešení. Zohledňují se zkušenosti příslušného konstruktéra, know-how výrobního podniku a obecná doporučení, jež je v omezené míře možné nalézt v odborné literatuře. Návrhový postup spočívá v iteračních úpravách geometrie a opakovaných kontrolních výpočtech, dokud nejsou dosaženy požadované parametry. Nutno podotknout, že výsledkem tohoto postupu je pouze návrhová dokumentace prototypu, která bezpečně nezaručuje dosažení všech požadovaných parametrů na fyzickém zařízení. Dosahované parametry se potvrdí během provozních zkoušek a jejich hodnoty garantované výrobcem před zhotovením zařízení tak závisí zejména na úrovni zkušenosti výrobce s daným konstrukčním typem z dřívějších realizací. Rozměry spalovacích komor se určují dle zkušeností či doporučených hodnot z příslušné odborné literatury. Základními určujícími parametry jsou přitom přípustné tepelné zatížení (empirické, závisí na užitých materiálech) a výstupní teplota spalin ( $T_{bw}$ ).

Při výpočtu spalovacích komor menších výkonů je důležitou součástí postupu výpočet potřebné sálavé plochy výměny tepla (jak membránové stěny, tak nechlazené vyzdívky s charakteristickým prostupem tepla do okolí), pro dosažení požadované výstupní teploty. U velkých zařízení je zvykem pokrývat aktivně chlazenou plochou všechny stěny ohniště a zpětně se kontroluje, zda je výstupní teplota dostatečně nízká. Ve zúžené výstupní části ohniště, nad přívodem sekundárního vzduchu, kde dochází k dohoření prchavých složek hořlaviny, tzn. v dohořovací komoře, musí být při spalování paliv na odpadní bázi z legislativních důvodů zádržná doba spalin minimálně  $\tau_{SP} = 2 \text{ s}$ <sup>8</sup>. Studie uvažující tuto zádržnou dobu spíše podle fyzikální podstaty a neuvažují rezervu udávají  $\tau_{SP} > 1,5 \text{ s}$ <sup>9</sup>. Jsou zde zároveň umístěny radiační výhřevné plochy, které snižují reálnou teplotu spalin na předem určenou teplotu. Ta je legislativně vázána nad 850 °C (resp. 1100 °C) dle obsahu chloru a povahy paliva<sup>8</sup>. Vyšší teplota vede ke zvýšené tvorbě termických NO<sub>x</sub>. Přesáhnutí teplotního intervalu pak tedy není vhodné pro efektivní použití SNCR technologie pro snižování NO<sub>x</sub> a zároveň může způsobit vznik nánosů z měkkého popela.

Zádržná doba se zajistí dostatečným objemem dohořovací komory a tokem spalin příslušnou střední rychlostí. Rychlost spalin a jejich hmotnostní tok pak určí potřebný průřez komory, ze kterého jsou určeny její rozměry. Tepelný výpočet ohniště využívá podobnostní číslo známé jako *Boltzmannovo číslo*. Umožňuje výpočet přibližné teploty spalin ve výstupním okně dohořovací komory v závislosti na geometrii spalovacího zařízení, podílu nechlazené vyzdívky a chlazené membránové stěny tvořící vnitřní povrch ohniště zařízení a několika dalších koeficientech popisujících chování spalin a typ zařízení<sup>10</sup>.

Popis výpočetního postupu je možné v různých stupních detailu nalézt v příslušné literatuře<sup>10–14</sup> a založen na tzv. *Gurvičově* metodě (podle jednoho z autorů), resp. obecněji na tzv. metodě *CKTI* (podle instituce, která je původcem první sjednocené metodologie – „*Centrální Kotleturní Institut*“ v bývalém Sovětském Svazu)<sup>13</sup>. Do výpočtu vstupuje velké množství empirických dat z provozu z doby její definice, zejména uhelných kotlů středních a vyšších výkonů, což v dnešní době znamená nutnost korekcí pro zařízení výrazněji vybočující z této skupiny. Korekce takto publikované v posledních letech zahrnují například úpravu pro fluidní kotle velmi vysokých tepelných příkonů<sup>12</sup>.

Postup výpočtu, používaný v průmyslu, se od své první definice výrazně neměnil. V odborné literatuře (např.<sup>13</sup>) lze sledovat změny v dílčích výpočtech, či definicích podobnostních čísel pro zjednodušení, či zobecnění výpočtů. Celkem takto můžeme rozeznat několik sovětských variant výpočtu a v současné době dvě navazující čínské varianty. Jejich aplikovatelnost při různém zatížení kotle, posouzená srovnáním s naměřenými hodnotami, je přehledně analyzována například ve výše zmíněném článku<sup>13</sup>.

Celý prostor ohniště je považován za jednu výpočtovou doménu – zónu. Jde o zjednodušení běžné při projekčních výpočtech. Další, jemnější dělení domény pak může sloužit pro odhad tepelného zatížení po výšce ohniště. To však vyžaduje znalost přibližných výsledků dle první iterace výpočetního postupu a také předpokládaný průběh vyhoření paliva<sup>13</sup>. Jádrem výše zmiňované *Gurvičovy* metody je založeno na následujícím semiempirickém vzorci, popisujícím poměrné zchlazení spalin mezi plamenem a výstupem z ohniště<sup>10</sup>:

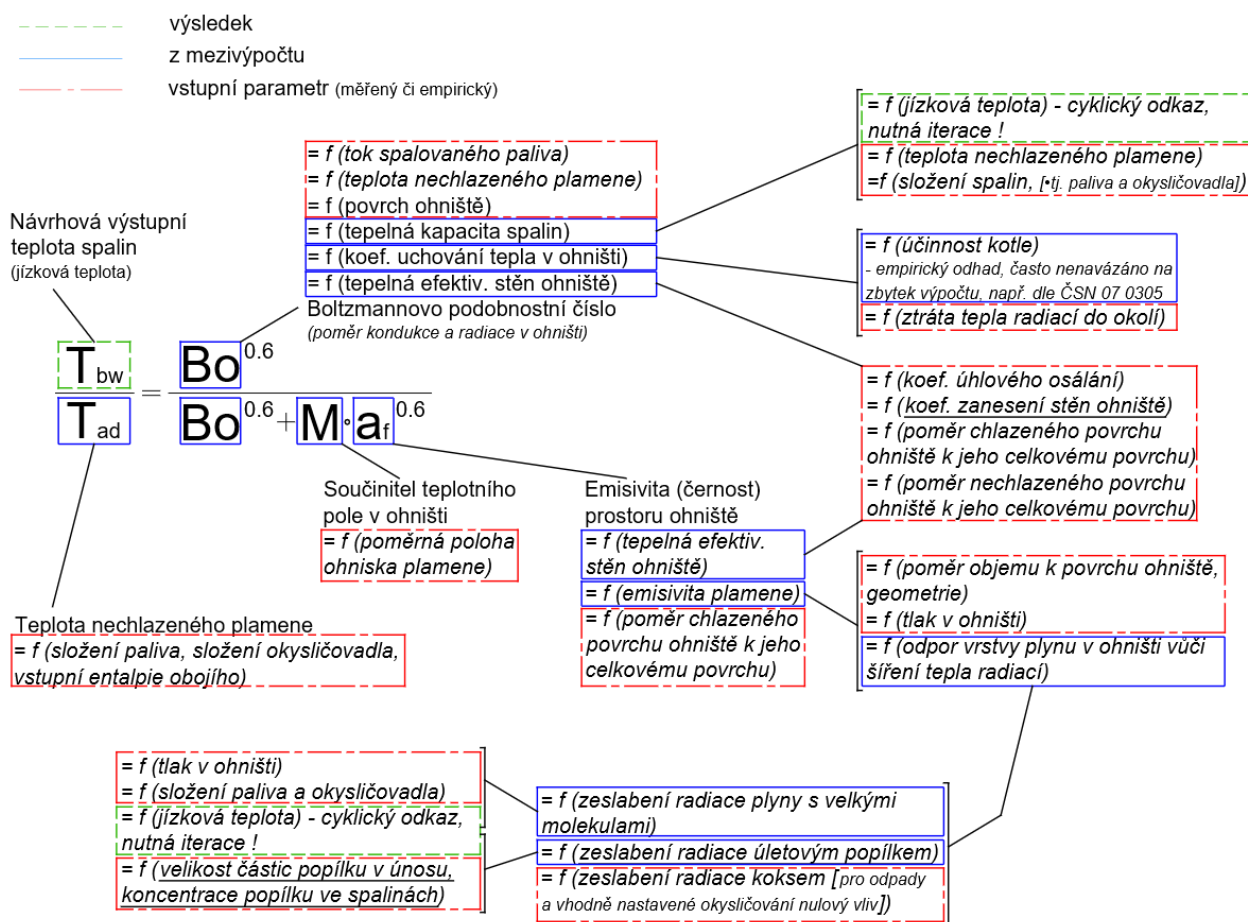
$$\frac{T_{bw}}{T_{ad}} = \frac{Bo^{0,6}}{M \cdot \alpha_f^{0,6} + Bo^{0,6}} \quad \#(1)$$

kde:

- $T_{bw}$  [K] je nastavená a iteračně upřesňovaná teplota spalin na výstupu ze spalovací komory (označení z anglického „bridgewall temperature“; jindy uváděno jako FEGT („furnace exit gas temperature“), nebo v českém prostředí také označovaná a nazývaná jako  $T_{ok}$  – teplota ve výstupním okně ohniště, anebo nejčastěji jako „jízková teplota“)
- $T_{ad}$  [K] je analyticky vypočtená adiabatická teplota plamene daného paliva
- $Bo$  [–] je Boltzmannovo podobnostní číslo (závislé na  $T_{ad}$  a vyjadřující příspěvek záření k celkovému přenosu tepla ve spalovací komoře)
- $M$  [–] empirický součinitel pozice plamene v ohništi
- $\alpha_f$  [–] charakteristická emisivita prostoru ohniště (občas označována také jako „černost“ ohniště)

Tato metoda je velmi vhodná pro různé typy spalovacích komor (s roštem, s hořákem, fluidní lože atd.) určené pro vyšší výkony, ale u spalovacích komor se středním a nízkým výkonem má tendenci ke

ztrátě přesnosti<sup>13</sup>. Kromě toho však ztrácí přesnost i změnou některých vlastností paliv, která jsou v navrhovaných zařízeních spalována. Mezi empirickými parametry, vstupujícími do návrhového výpočtu, jsou mimo jiné i hodnoty popisující charakteristické chování produkovaného úletového popílku. Jejich vztah k členům rovnice (1) schematicky znázorňuje obrázek 3.



**Obrázek 3: Schematické znázornění vzájemných funkčních závislostí vstupních parametrů projekčního výpočtu dle rovnice 1 (identifikované zanášivé parametry jsou podtrženy)**

Empirické parametry zanášení vstupující do standardního návrhového výpočtu a identifikované na obrázku 3 jsou pak detailněji popsány v tabulce 1.

**Tabulka 1: Parametry popisující zanášivé chování popílku, vstupující do projekčního výpočtu dle rovnice (1)**

Param.	Jednotka.	Popis	Ovlivněno (čím)	Ovlivňující (co)
$\mu$	$\frac{g}{m^3_N}$	Koncentrace popílku ve spalinách	Obsah popela v palivu, Objem mokrých spalin	Charakteristická emisivita $a_f$
$\xi$	-	Součinitel znečištění stěny pece, nezaměňovat se součinitelem znečištění pro výměníky tepla – zde parametr popisuje vyšším číslem povrch s tendencí absorbovat více tepla	Zvláště z $\xi \in < 0,1; 0,4 >$ (tradiční hodnoty používané pro uhelné kotle)	Charakteristická emisivita $a_f$ , Boltzmannovo číslo $Bo$
$z_c$	hm. %	Popisuje ztrátu mechanickým nedopalem v palivu. Hořlaviny obsažené v unášeném popílkem mají tendenci měnit jeho zanášecí vlastnosti, pokud jsou zastoupeny v dostatečném procentu.	Obsah popela v palivu	Boltzmannovo číslo $Bo$

Popílek z některých neušlechtilých paliv a mixů vykazuje tak nízkou teplotu měknutí, že je třeba počítat se značným znečištěním i při teplotách nezbytných pro ekonomický provoz kotle. Zejména při spalování nebo spoluspalování travní biomasy se často vyskytuje popel s teplotou měknutí nižší než 700 °C<sup>15</sup>. Nánosové vrstvy, zabraňující přenosu tepla, však mohou vznikat i jinými procesy. Je možné se například setkat s frakcemi popílku, které mají tendenci tvořit nánosy převážně mechanickým vázáním.

## 2. Studie vlivu parametrů zanášení

Byla provedena studie vlivu parametrů uvedených v tabulce 1 zohledňujících vlastnosti produkovaného popílku, resp. zanášivé vlastnosti při spalování daného paliva na referenčním souboru dat získaných provozním měření na zařízení, spadajícím do výše definované kategorie „malých“, tj. lokálních spalovacích zařízení. Jako provozní měření je zde myšlen soubor kontinuálně snímaných veličin systému měření a regulace kotle, nezbytných pro automatický provoz jednotky ZEVO.

Hlavní nominální provozní a konstrukční parametry sledovaného zařízení ve trojici ustálených režimů provozu a srovnání vlivu umělé manipulace sledovaných proměnných s výsledkem rovnice (1) při standardních empirických hodnotách parametrů z tabulky 1 popisuje tabulka 2.

**Tabulka 2: Referenční provozní a konstrukční parametry studovaného zařízení v ustálených režimech**

Parametr	Popis	Hodnota	Jednotka
		Provozní stav 1   2   3	
Geometrie:	Rozměr spalovací komory	4,6 x 3 x 1,3	m
	Plocha roštu	5,16	m <sup>2</sup>
	Sklon roštu	16	°
	Plocha výměn tepla	45,23	m <sup>2</sup>
	Plocha vyzdívky	38,43	m <sup>2</sup>
Spalovací	Primární/sekundární	Ano	-
Vzduch:	Přebytek vzduchu	2,25   1,78   1,49	-
	Recirkulace spalín	Ne	-
Palivo:	Druh paliva	Nemocniční odpad	-
	Výhřevnost (LHV)	15547 *	kJ/kg
	Průtok	352   319   303	kg/h
	Obsah vlhkosti	34	hm. %
	Obsah popelovin	6,0	hm. %
	Tepelný výkon	1,52   1,42   1,76	MW
Zanášení: (empirické hodnoty)	Koncentrace úletového popílku ( $\mu$ )	1,84	g/m <sub>N</sub> <sup>3</sup>
	Součinitel zanesení stěn pece ( $\xi$ )	0,1 (vyzdívkované)	-
	Ztráta nedopalem ( $Z_C$ )	5,7	hm. %
	Střední velikost částice popílku ( $d_{cp}$ )	20	$\mu$ m
Mezivýpočty:	Adiabatická teplota plamene ( $T_{ad}$ )	1053,1   1263,8   1439,4	°C
	Boltzmannovo číslo ( $Bo$ )	19,0708	-
	Součinitel polohy plamene ( $M$ )	0,59	-
	Černost prostoru ohniště ( $a_f$ )	0,0434	-
Teploty:	Střední teplota v ohništi	990,4   955,3   969,0	°C
	Jízková teplota ( $T_{bw}$ ) - měřená	<b>927,6   936,4   1000,7</b>	°C
	Jízková teplota ( $T_{bw}$ ) - vypočtená	<b>943,0   1084   1183,4</b>	°C

\* Návrhová hodnota kotle, založeno na předcházejícím hrubém rozboru složek zneškodňovaného odpadu

## 2.1. Metodika

Obrázek 3 (výše) znázorňuje vzájemné souvislosti parametrů kotlového ohniště, vstupující do projekčního výpočtu jízkové teploty v ohništi dle rovnice (1). Návrhový výpočet nového ohniště vyžaduje několikanásobnou iteraci výpočtu (implicitně vyjádřená rovnice s cyklickou závislostí hodnoty  $T_{bw}$  na sobě sama), kdy jsou mezi iteracemi prováděny změny v geometrii ohniště a na souvisejících teplosměnných plochách <sup>10-14</sup> – v tomto případě je však výpočet kontrolní, vázaný na existující referenční spalovací zařízení a zejména jeho fixní parametry, což iteraci omezuje pouze na nalezení řešení implicitní rovnice (1). Je použit výpočetní skript v prostředí *Matlab R2020b* pro nalezení řešení rovnice (1), při návrhových parametrech svázaných s referenčním zařízením (např.  $T_{ad}$ , geometrické parametry) v několika ustálených provozních stavech a parametrech doporučených dle literatury pro daný typ ohniště (např.  $M$ ,  $d_{cp}$ ,  $\xi$ ,  $\mu$ ), a jeho srovnání s naměřenou jízkovou teplotou ze systému MaR („měření a regulace“) předmětného zařízení.

Definice pomocných výpočtů, vstupujících do řešení rovnice (1), je možné nalézt v odborné literatuře (např. <sup>10-14</sup>) a z důvodu rozsahu článku zde nebudou uváděny.

Trojice referenčních stavů je následně použita jako základ citlivostní studie vlivu vybraných parametrů, spojených se zanášivými vlastnostmi popílku v proudu spalin, u kterých lze očekávat změnu hodnoty ve spojení se změnou použitého paliva, na výsledek rovnice (1).

Pro simulování referenčních stavů jsou použity bodové hodnoty odečtené ve třech různých dnech z řídicího systému ve chvíli, kdy bylo na zařízení sledováno předcházející alespoň půlhodinové držení měřené teploty v intervalu  $\pm 10$  °C, bez změn v nastavení regulovaných veličin.

Použité prvky MaR referenčního kotle:

- Měření teploty – Termočlánek do jímky, typ K, SenzoTemp PT22, třída přesnosti 2 dle EN 60584, deklarovaná odchylka  $\pm (2,5 \text{ °C} + 0,0075 \times T)$ . Měřicí jímka  $T_{bw}$  umístěna v hrdle výstupní příruby dohořivací komory.
- Měření průtoku – Nepřímé měření z rozdílu tlaků na Prandtlově sondě AirFlow AL-V650 T2A6, deklarovaná odchylka měření rychlosti  $\pm (0,2 \text{ m/s} + 3 \text{ \% z měřené hodnoty})$ . Měření průtoku spalovacího vzduchu umístěno na rovných úsecích výtlačku ventilátorů spalovacího vzduchu.
- Tlak v ohništi – Diferenční snímač tlaku SenzoDelta PRE-50G, deklarovaná odchylka  $\pm 0,25 \text{ \%}$
- Dávkování paliva – Tenzometrická váha na vstupu do plnicího zařízení (deklarovaná odchylka  $\pm 0,5 \text{ kg}$ ) + časový záznam o plnění, průměrováno za 1 hodinu

Geometrické parametry referenčního zařízení byly získány z provozní dokumentace zařízení, kterou není možné sdílet. Přebytek spalovacího vzduchu byl vyjádřen ze stechiometrie hoření vůči předpokládanému chemickému složení paliva – použito návrhové složení paliva u daného kotle, u odpadu však může být reálné složení v průběhu času výrazně kolísající.

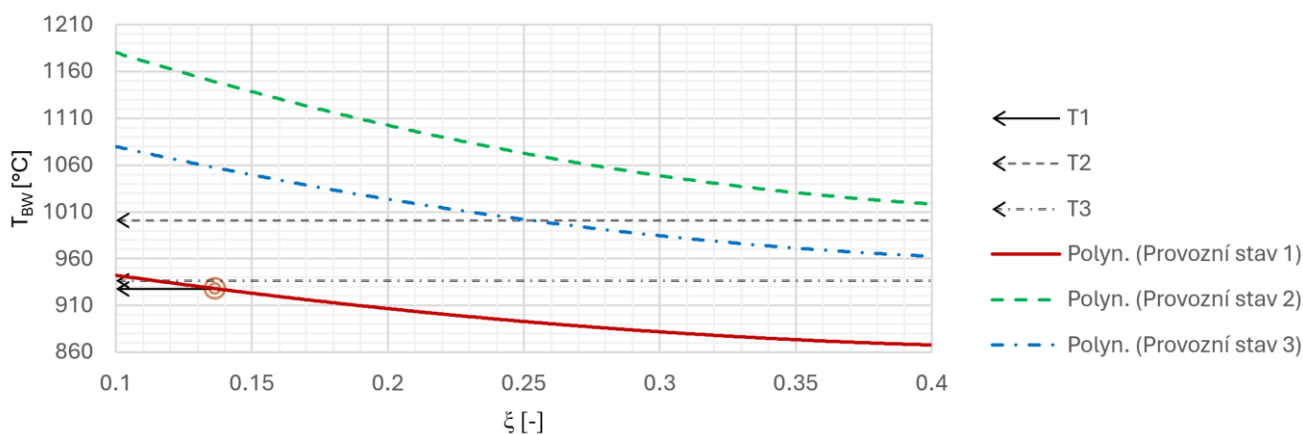
V našem případě je referenčním zařízením kotel spalující nemocniční odpad, který vzhledem ke své nebezpečné povaze neumožňuje rutinně provádět elementární rozboru svého složení <sup>8</sup>. Pro odhad složení paliva, nutný při návrhovém výpočtu ohniště je k dispozici omezené množství elementárních rozborů výhřevného nemocničního odpadu v literatuře (např. <sup>19</sup>), ale dle zaměření nemocnice či oblasti se mohou výrazně odlišovat. Je však možné provést alespoň hrubé zjištění hmotnostního zastoupení hlavních přípustných skupin materiálů ve spalované směsi (papír, plasty, kovy, ...) a nutná data jako je výhřevnost, bilance spalin, atd. odhadnout na základě váženého poměru složek (přístup např. dle <sup>20</sup>). Spolu s uvedenými nepřesnostmi jednotlivých prvků MaR to prakticky znamená, že níže diskutované výsledky je nutné považovat za nepřesné a zaměřit se pouze na informaci o poměrné velikosti změny jejich hodnot, nikoli samotné jejich číselné hodnoty.

## 2.2. Výsledky a diskuse

Hrubou citlivostní analýzou parametrů zanášení vstupujících do rovnice (1) v rozsahu technicky dosažitelných hodnot – tj. buď přímou manipulací se zkoumaným parametrem, nebo s charakteristikou paliva, která jej ovlivňuje – bylo zjištěno, že ani koncentrace popílku ve spalinách ( $\mu$ ), ani tepelné ztráty zbytkovou hořlavou látkou v něm obsaženou ( $Z_c$ ) nemají tak významný vliv na změnu  $T_{bw}$  jaký má součinitel znečištění povrchu pece ( $\xi$ ) v současné výpočtové struktuře. Teplotní rozdíly způsobené parametry  $\mu$  a  $Z_c$  faktory byly zjištěny jako nepatrné za podmínek, které by mohly vést až k takovým stavům, jako jsou nepřijatelné emise. V případě  $\xi$  bylo vyčíslení provedeno přes interval literaturou doporučovaných přípustných hodnot pro různé druhy nechlazených vnitřních povrchů ohniště, v případě  $\mu$  byl posuzován celý interval od předpokladu nulové koncentrace úletového popílku po plný proud, v případě  $Z_c$  potom vyčíslení proběhlo v intervalu voleném mezi kompletním vyhořením hořlaviny v palivu po zachování cca 1/3 hm.% hořlaviny v úletovém popílku. Vyčíslení je pak provedeno na každém z intervalů v minimálně 5 ekvidistantních bodech, při zachování všech ostatních neovlivněných parametrů na konstantní hodnotě. Zobrazené závislosti jsou proložením výsledků polynomy druhého stupně, s koeficientem determinace ve všech případech  $R^2 > 99\%$ .

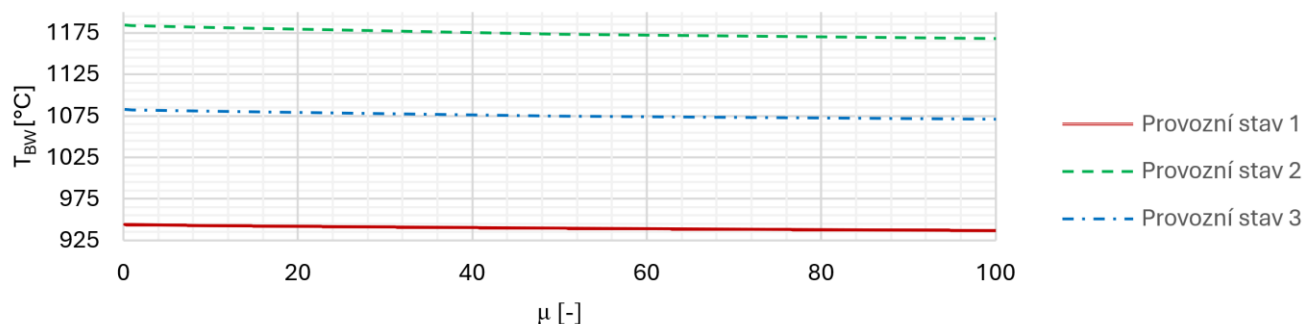
Popílky z různých paliv mají různé vlastnosti znečištění. Je proto zřejmé, že například vysoce znečišťující popílek ze spalování biomasy nebo popílek z určitých složek hořlavého pevného odpadu může vést k zanesení vnitřního prostředí ke změně skutečné hodnoty parametru  $\xi$ .

Obrázek 4 jasně ukazuje, že rozdíl v  $T_{bw}$  zjištěný ve studovaném ohništi je možné (pokud vynecháme další možné zdroje chyb) pokrýt – úplně, nebo z téměř úplně – změnou hodnoty návrhového parametru  $\xi$ . U referenčního provozního stavu 1 vychází plné pokrytí chyby změnou hodnoty  $\xi$  pro vnitřní povrch prostoru ohniště z 0,1 na 0,136, což je stále v mezích jeho přijatelných hodnot. U referenčních provozních stavů 2 a 3, charakteristických vyššími naměřenými hodnotami  $T_{bw}$  oproti stavu 1, je viditelné nedokonalé pokrytí odchylky i při uvažování hodnoty  $\xi$  na úrovni vodou chlazené stěny bez snížené účinnosti pokrývající kompletně celý povrch prostoru ohniště.



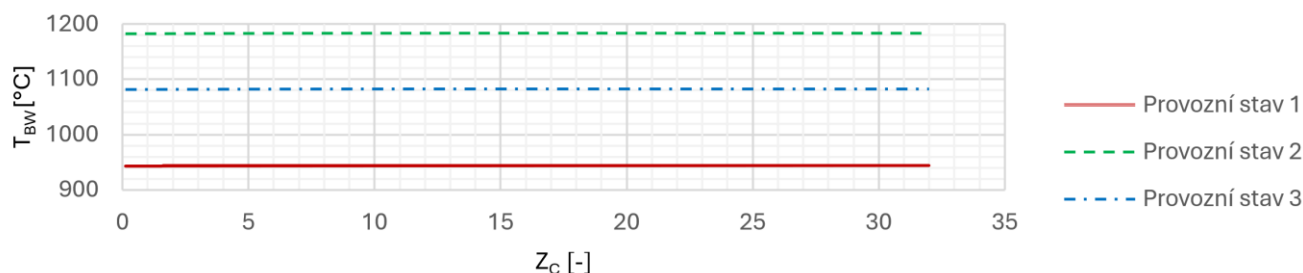
**Obrázek 4: Závislost vypočtené jízkové teploty spalin na parametru  $\xi$  (součinitel zanesení stěny ohniště); T1-3 značí měřenou hodnotu  $T_{bw}$  pro daný referenční provozní stav**

Z obrázku 5 je patrné, že současný výpočetní aparát pro spalovací komory není koncipován tak, aby se parametr koncentrace popílku ve spalinách  $\mu$  nepromítal do spočtené jízkové teploty spalin mimo fyzikálně možný interval (tj. není možné, aby byl proud spalin reálně tvořen 100 % hmotou popílku, ačkoli zjednodušený model to dovoluje). Zároveň je ale patrná nízká závislost jízkové teploty na vlivu hodnoty této koncentrace a není tak možné pouze tímto parametrem vysvětlit zaznamenaný rozdíl v  $T_{bw}$ .



**Obrázek 5: Závislost vypočtené jízkové teploty spalin na parametru  $\mu$  (koncentrace úletového popílku ve spalinách)**

Citlivost standardního projekčního výpočtu ohniště na parametru mechanického nedopalu  $Z_c$  je, jak ukazuje následující obrázek 6, prakticky nulová. Stechiometrie složek paliva a spalovacího vzduchu je totiž standardně sledována ve spalovacích výpočtech mimo samotný *Gurvičův* model, a to při posuzování toku, složení spalin a entalpie jimi nesené. Tyto hodnoty do rovnice (1) vstupují už jen jako teplota  $T_{ad}$ . Zároveň množství spalovaného paliva vstupující do výpočtu  $Bo$  je očištěno o nedopal a vyjadřuje reálně pálené množství. Do  $Bo$  se tak  $Z_c$  propisuje pouze okrajově v hodnotě odhadované termické účinnosti kotle.



**Obrázek 6: Závislost vypočtené jízkové teploty spalin na parametru  $Z_c$  (mechanický nedopal)**

Je nutno zdůraznit, že výše udané číselné hodnoty jsou platné pouze pro uskutečněnou případovou studii konkrétního ohniště. Obecné trendy prezentovaných závislostí a skutečnost, zda byl zaznamenán praktický vliv daného parametru, který může vysvětlovat odlišnost naměřených a vypočtených hodnot, však lze považovat za všeobecně platné.

Protože volba hodnoty  $Z_c$  má zanedbatelný vliv na přesnost výpočtu rovnice (1), je zřejmé, že pozornost je potřeba upřít na parametry  $\xi$  a  $\mu$ , jejichž vliv na přesnost výpočtu rovnice (1) je znatelný. Oba tyto parametry přitom souvisí se zanášivostí spalin, tj. s velikostí a vlastnostmi částic unášeného úletového popílku v nich.

Provozní data z referenčního zařízení byly odečteny během běžného provozu, pro již znečištěné zařízení. Předmětné zařízení není vybaveno kontinuálním sledováním stavu zanesení vnitřního prostoru ohniště (možné sledovat vzhledem ke změnám teplotního pole, což popisuje např. článek <sup>21</sup>), není tedy k dispozici soubor dat o odpovídajícím stavu zanesení spalovací komory a kotle.

### 3. Aparatura pro zjišťování zanášivosti spalin a dalších horkých proudů

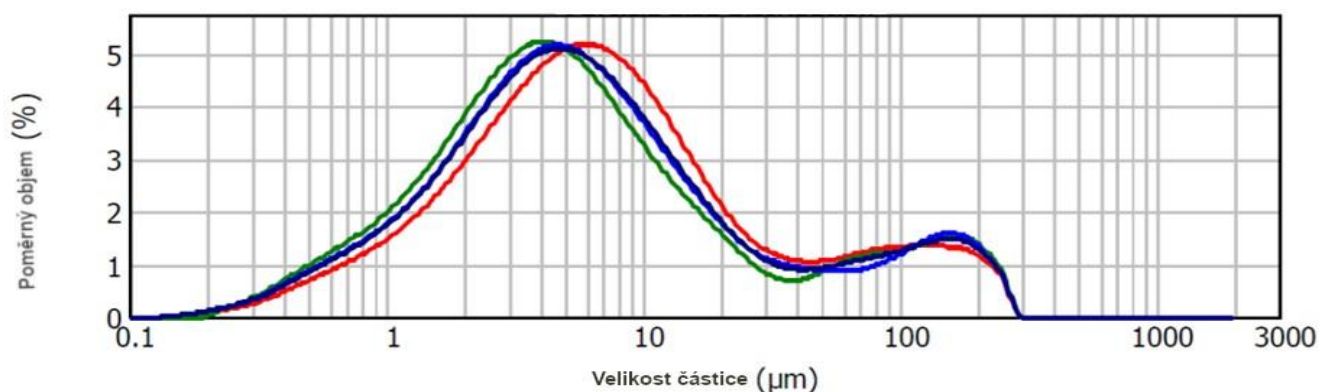
Doposud diskutované vlivy zanášivých parametrů byly uvažovány pouze v rozsahu domény samotné spalovací komory – tedy ohniště a případného prostoru membránové stěny kotle. Zásadním krokem při návrhu kotle je ale také návrh navazujících konvekčních teplosměnných ploch kotle a správná volba jejich základních geometrických parametrů. Tyto konvekční teplosměnné plochy jsou, stejně jako radiační membránová stěna, kontinuálně zanášeny úletovým popílkem<sup>9</sup>. Proměnlivá povaha zanášení vlivem úletového popílku produkovaného daným palivem vyžaduje zařízení, které inženýrům umožní předem a co nejpřesněji určit vlastnosti znečištění daného proudu spalin, aby bylo možné navrhnout vhodné povrchy pro výměnu tepla pro využití vyrobeného tepla. V případě aplikací provozovaných v podmínkách znečištění však obvykle není známo, která konkrétní geometrie bude odolná vůči znečištění a která bude fungovat spíše špatně. Míra a princip zanášení těchto teplosměnných svazků jsou pevně spjaty s chováním popílku produkovaného v předřazeném ohništi daného kotle, během vývoje a ranné aplikace tohoto zařízení proto byly zjištěny některé skutečnosti doplňující data popisovaná v předcházející kapitole.

Na obrázku 7 je znázorněna mobilní aparatura nedávno vyvinutá na pracovišti autorů tohoto článku pro zjišťování zanášivého chování spalin a horkých plynných proudů na různých geometriích teplosměnných ploch a pro získávání vzorků tvořících se nánosů. Bližší popis principu a konstrukce této aparatury je možné nalézt v předcházející publikaci autorů<sup>16</sup>.



**Obrázek 7: Řez sestavou vyvinuté aparatury pro sledování zanášivých vlastností spalin a plynných proudů nesoucích zbytkové teplo (vlevo). Pohled na zanesený trubní svazek aparatury po krátkodobém sledování tvorby nánosů úletového popílku z již ochlazených spalin z dřevní biomasy (uprostřed) a z odpadního horkého plynného proudu cementárny (vpravo)**

V rámci projektu, ve kterém byl aparát vyroben a ozkoušen, ani následujícího období, nebyl proveden žádný test na popílku z paliva srovnatelného s nemocničním odpadem. Byly však zaznamenány odchylky velikosti střední frakce částic úletového popílku v analyzovaných nánosech ze spalování paliva na bázi dřevní biomasy od standardních návrhových hodnot uvažovaných pro pevná paliva, což se může dále promítnout do procesu tvorby nánosů na konvekčních teplosměnných plochách<sup>23</sup>, ale také má marginální dopad zpětně ve výše diskutovaném návrhovém výpočtu kotlového ohniště svým vlivem na velikost zeslabení radiačního tepelného toku v prostoru spalovací komory<sup>15</sup>.



**Obrázek 8: Distribuce velikosti částic úletového popílku odebraného ze zařízení na spalování dřevní biomasy a komunálního odpadu (výsledky měření na trojici odebraných vzorků)**

Velikost a distribuce velikosti částic úletového popílku ze spalovacího zařízení na směs dřevní štěpky a odpadu (odběr vzorků proveden při 100% spalování dřevní štěpky), byla zjišťována metodou laserové difrakce. Výsledky analýzy distribuce velikosti částic provedené na měřicím zařízení *Malvern Instruments Mastersizer 2000* jsou patrné níže z obrázku 8. Laserová difrakce odhalila dvě lokální maxima v zastoupení částic, první globální maximum okolo 5 µm, druhé mnohem méně výrazné lokální maximum okolo 170 µm.

Parametr  $d_{cp}$  [µm] je střední efektivní průměr částice popílku v úletu, do návrhu spalovací komory vstupuje během odhadu zeslabení radiačního tepelného toku v prostoru ohniště<sup>15</sup>. Při výpočtu se přitom dosud standardně používá empirická střední hodnota  $d_{cp} = 20 \mu\text{m}$ <sup>10</sup> pro všechny druhy pevných paliv spalovaných na roštu. Tato hodnota vychází z historických analýz popílků ze spalování uhlí a jak je patrné z ukázky naměřených dat na obrázku 8, pro popílek ze současných odpadových paliv může mít zásadně odlišné hodnoty. Jelikož se jedná o specificky úletový popílek, může se na jeho odlišné velikosti střední frakce v odebraných vzorcích, mimo složení paliva, projevat i odlišné dávkování spalovacího vzduchu (značně vyšší poměr vzduchu je dávkován jako sekundární) a spojené změny v proudění odcházejících spalin – to je však opět rozdíl spojený s konstrukcí ohniště pro daný druh palivové směsi.

## 4. Závěr

Článek se zabývá problematikou tepelného návrhového výpočtu kotlového ohniště standardní, tzv. *Gurvičovou* metodou, a vlivu změn v empirických parametrech, popisujících zanášivé chování produkovaných spalin současných ohnišť spalujících alternativní odpadové palivové mixy a biomasu. Tato problematika v sobě odráží současný trend přechodu od uhelných paliv k alternativním pevným palivům majícím odlišné spalovací vlastnosti a vyžadujícím tak korekce v návrhovém výpočtu kotlového ohniště. Případová studie na datech z provozu referenčního zařízení na termické zpracování nemocničního odpadu s roštovou spalovací komorou o maximálním výkonu 1,8 MW a následující citlivostní analýza vlivu konkrétních zásadních identifikovaných parametrů výpočtové metody nachází možnost zpřesňující korekce zejména v parametru zanesení povrchu ohniště ( $\xi$ ) a malý vliv pak v parametru koncentrace úletového popílku ve spalinách ( $\mu$ ), které ovlivňují radiační tok tepla ohništěm. Tyto parametry bude v budoucnu navíc prakticky možné zpřesňovat pomocí dat měřených s užitím vyvinuté mobilní testovací aparatury pro testování zanášivých vlastností spalin, kterou lze instalovat na provozované realizace kotlových ohnišť. Lepší porozumění vlivu volby hodnot koeficientu  $\xi$  pak takto může v budoucnu pomoci při návrhu nových kotlových ohnišť na alternativní paliva. Oba parametry jsou také spojené se střední hodnotou velikosti unášených částic popílku. Tato hodnota byla u popílku odebraného na zařízení spalujícím alternativní palivo laboratorně určena jako zásadně odlišná od dosud standardně doporučovaných výpočtových hodnot pro návrhový tepelný výpočet kotlových ohnišť. Testovací aparaturu je plánováno do budoucna využít na další dostupné popílky.

## Poděkování

Části této práce vznikly za finanční podpory Technologické agentury České republiky v rámci výzkumného projektu č. TK05020076 „Vývoj mobilního testeru pro bezpečné a spolehlivé využití tepla ze znečišťujících spalín a generátoru amoniaku k jejich čištění“, GA VUT v rámci výzkumného projektu č. FSI-S-26-8968, projektu EU Strategické partnerství pro environmentální technologie a výrobu energie, financovaného jako projekt č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/16\_026/0008413 z Operačního programu Výzkum, vývoj a vzdělávání České republiky. Dále patří díky firmě EVECO Brno s.r.o. za poskytnutí provozních dat z vybraných realizací.

## Literatura

1. Ciupek, B., Frąckowiak, A.: *Review of Thermal Calculation Methods for Boilers - Perspectives on Thermal Optimization for Improving Ecological Parameters*. *Energies* 17, (2024). doi: 10.3390/en17246380
2. Yin, C., Li, S.: *Advancing grate-firing for greater environmental impacts and efficiency for decentralized biomass/wastes combustion*. *Energy Procedia* 120, s. 373 – 379, (2017). doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.220
3. Obernberger, I.: *Decentralized biomass combustion: state of the art and future development*. *Biomass and Bioenergy* 14, s. 33 – 56 (1998). doi: 10.1016/s0961-9534(97)00034-2
4. Cyranka, M., Jurczyk, M.: *Energy recovery from municipal waste based on moving grate technology*. *Agricultural Engineering* 20, s. 23 – 33 (2016). doi: 10.1515/agriceng-2016-0003
5. Kalak, T.: *Potential Use of Industrial Biomass Waste as a Sustainable Energy Source in the Future*. *Energies* 16, (2023). doi: 10.3390/en16041783
6. EVO Planá - Energie z odpadu Táborska. <https://www.c-energy.cz/evo>, staženo 01.03.2026
7. Výstavba multipalivového kotle EU II. [https://portal.cenia.cz/eiasea/detail/EIA\\_VYS1268?lang=cs](https://portal.cenia.cz/eiasea/detail/EIA_VYS1268?lang=cs)), staženo 01.03.2026
8. Neuwahl, F., Cusano, G., Gómez Benavides, J., Holbrook, S., Roudier, S.: *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control)*, EUR 29971 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76-12993-6, doi: 10.2760/761437
9. Van Beek, M.C., Rindt, C.C.M., Wijers, J.G., Van Steenhoven, A.A.: *Analysis of Fouling in Refuse Waste Incinerators*. *Heat Transfer Engineering* 22, s. 22-31 (2001). doi: 10.1080/01457630117134
10. Vyhláška č. 415/2012 Sb. ze dne 30.11.2012 o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. Sbirka zákonů 2012, částka 151
11. Obernberger, I., Brunner, T., Bärnthaler, G.: *Chemical properties of solid biofuels-significance and impact*. *Biomass and Bioenergy* 30, s. 973–982 (2006). doi: 10.1016/j.biombioe.2006.06.011
12. Basu, P., Kefa, C., Jestin, L.: *Boilers and Burners - Design and theory*. Springer, New York 2009. doi: 10.1007/978-1-4612-1250-8
13. Kakaç, S.: *Boilers, evaporators and condensers*. John Wiley & Sons, Hoboken 1991. doi: 10.5860/choice.30-0313
14. Zhang, Y., Li, Q., Zhou, H.: *Heat Transfer Calculation in Furnaces*. Theory and Calculation of Heat Transfer in Furnaces, s. 131–172 (2016). doi: 10.1016/b978-0-12-800966-6.00005-3.
15. Rutkowski, Ł., Szczygieł, I.: *Calculation of the furnace exit gas temperature of stoker fired boilers*. *Arch. Thermodyn.* 42, s. 3 – 24 (2021). doi: 10.24425/ather.2021.138107
16. Gurvic, A. M., Bloch, A. G.: О температуре топочного пространства. *Энергомашиностроение* 11 – 15 (1956).
17. Niessen, W. R.: *Combustion and Incineration Processes - Applications in Environmental Engineering*. Taylor and Francis Group, Boca Raton 2010. doi: 10.1201/EBK1439805039

18. Zabloudil, J., Jegla, Z., Daxner, J., Babička Fialová, D., Freisleben, V., Reppich, M.: *Construction of a Modular Device for Testing High-Temperature Flue-Gas Fouling in Waste-Heat Sources*. 30st Int. Conf. Engineering Mechanics 2024, s. 322 – 325 (2024). doi: 10.21495/em2024-322
19. Li. C., Jenq. F.: *Physical and Chemical Composition of Hospital Waste*. Infection Control and Hospital Epidemiology 3, s. 145 – 150 (1993). doi: 10.2307/30148478
20. Lin. X., Wang. F., Chi, Y., Huang, Q., Yan, J.: *A simple method for predicting the lower heating value of municipal solid waste in China based on wet physical composition*. Waste Management 36, s. 24 – 32 (2015). doi: 10.1016/j.wasman.2014.11.020
21. Zhang. S., Shen. G., An, L., Li, G.: *Ash fouling monitoring based on acoustic pyrometry in boiler furnaces*. Applied Thermal Engineering 84, s. 74 – 81 (2015). doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.03.019
22. ČSN 06 3090: *Zařízení pro termické odstraňování/zneškodňování a energetické využívání odpadů* (březen 2007).
23. Wacławiak, K., Kalisz, S.: *A Practical Numerical Approach for Prediction of Particulate Fouling in PC Boilers*, Fuel 97, s. 38 – 48 (2012) doi: 10.1016/j.fuel.2012.02.007

## Influence of fly ash fouling properties on boiler furnace design for low-grade fuels based on waste and biomass

Jan ZABLOUDIL<sup>a</sup>, Zdeněk JEGLA<sup>a</sup>, Petr SKÁLA<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Institute of Process Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology; Technická 2; 616 69, Brno; Czech Republic, e-mail: 191771@vutbr.cz (Jan Zabloudil)

<sup>b</sup> EVECO Brno, s.r.o., Hudcova 660/76d, Brno; Czech Republic

### Summary

The article addresses the need to update empirical parameters used in boiler furnace design due to the transition from high-quality coal to lower-grade fuels such as combustible wastes and biomass. It focuses on the influence of three empirical parameters related to fly ash properties and fouling behaviour within the Gurchich furnace calculation method. A basic sensitivity study was performed on a real reference boiler by comparing calculated results with measured furnace outlet gas temperatures under several steady operating conditions. The results showed that adjusting the empirical furnace wall fouling parameter ( $\xi$ ) can significantly reduce discrepancies between calculated and measured values. The paper also presents a newly developed experimental device for evaluating fly ash fouling effects on convective heat exchanger surfaces, which has been tested with biomass fuels.

**Keywords:** waste-to-energy plant, grate waste incineration, grate firing of biomass, furnace design, furnace exit gas temperature, solid waste fuels, fly ash and particulate fouling