



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

Žilina, 2025

Ing. Michal Šrámk



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

Ing. Michal Šrámka

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

**Výskum faktorov ovplyvňujúcich vznik tuhých znečisťujúcich
látok pri spaľovaní tuhého alternatívneho paliva**

Na získanie akademického titulu **doktor**
(„philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“)
v študijnom odbore Strojárstvo
v študijnom programe Energetické stroje a zariadenia

Žilina 2025

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Žilinskej univerzite v Žiline, Strojníckej fakulte, Katedre energetickej techniky.

Predkladateľ: Ing. Michal Šrámka

Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra energetickej techniky.

Školiteľ: doc. Ing. Peter Ďurčanský, PhD.
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra energetickej techniky

Oponenti:

1. prof. Ing. Peter Tauš, PhD., TU v Košiciach
2. prof. Ing. Ladislav Dzurenda, PhD., DF TU Zvolen
3. doc. Ing. Michal Holubčík, PhD., Žilinská univerzita v Žiline

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa 26.8.2025..... o .11:00..... hod. v miestnostiBC 309 KET.. na SjF, Univerzitná 8215/1, 010 26, Žilina, pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenou odborovou komisiou v študijnom odbore Strojárstvo, v študijnom programe Energetické stroje a zariadenia, vymenovanou dekanom Strojníckej fakulty, Žilinskej univerzity v Žiline.

S dizertačnou prácou je možné sa oboznámiť na referáte pre vedu a výskum dekanátu SjF, UNIZA, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

Prof. Ing. Jozef Jandačka, PhD.
predseda komisie pre obhajobu
dizertačnej práce

ÚVOD

Stupňujúce sa obavy z kvality ovzdušia a jej vplyvu na ľudské zdravie vyvolali naliehavú potrebu komplexného výskumu a inovatívnych riešení. V časoch poznačených rastúcimi obavami o životné prostredie a neúnavným úsilím o udržateľné energetické riešenia sa spaľovanie tuhého alternatívneho paliva (TAP) ukázalo ako sľubná cesta. TAP, heterogénna zmes odpadových materiálov, poskytuje potenciálny zdroj energie a zároveň pomáha pri odpadovom hospodárstve. Proces spaľovania TAP však nie je bez environmentálnych výziev, medzi ktoré patrí tvorba emisií. V rôznych typoch priemyselných odvetví, kde je tuhé alternatívne palivo spaľované sa ukázalo, že jedným z hlavných problémov môže byť najmä tvorba emisií tuhých znečisťujúcich látok (TZL).

Existujú rôzne systémy na filtrovanie spalín, resp. odlučovanie TZL zo spalín, ale pri využívaní TAP ako paliva sa môžu účinnosti elektrostatických odlučovačov znižovať, a preto je potrebné sa tejto problematike venovať. Táto dizertačná práca skúma zložitú sieť faktorov, ktoré ovplyvňujú emisie tuhých znečisťujúcich látok v kontexte spaľovania tuhého alternatívneho paliva, aj so zameraním na vývoj meracieho zariadenia. Konečným cieľom je nielen presne kvantifikovať emisie TZL, ale aj rozlíšiť a porovnať rôzne ovplyvňujúce faktory, ktoré prispievajú k ich tvorbe. Dizertačná práca

prechádza mnohostranným skúmaním parametrov, ktoré zahŕňajú vlastnosti privádzaného vzduchu, variácie charakteristík paliva, keďže tuhé alternatívne palivo je veľmi nehomogénne z hľadiska materiálového zloženia. Taktiež sa môže sledovať ako veľkostné frakcie, vlhkosť, typy materiálov, resp. chemické zloženie ovplyvňujú tvorbu TZL.

Pri experimentálnom meraní sa vzorky paliva môžu spaľovať v navrhovanom experimentálnom zariadení, ktoré sa použije ako nástroj na meranie koncentrácií tuhých znečisťujúcich látok. Okrem toho budú použité a overené CFD simulácie spaľovacieho procesu s dôrazom tvorbu sadzí. Nakoniec, za účelom zníženia koncentrácií tuhých znečisťujúcich látok, budú navrhnuté zmeny na experimentálnom spaľovacom zariadení na základe výsledkov experimentu a modelu. Pointou je nielen pochopiť zložitosť tvorby TZL počas spaľovania TAP, ale tiež navrhnúť účinné systémy na zmiernenie ich vplyvu na životné prostredie.

1 STRUČNÝ PREHĽAD

PROBLEMATIKY

1.1 Typy používaných reaktorov pre analýzu palív

Výskumníci z VÚT Brno použili kombináciu termogravimetrickej analýzy a identifikácie distribúcie veľkosti jemných a ultrajemných častíc. Vzorky biomasy boli umiestnené do termogravimetrického analyzátora (TGA, NETZSCH Jupiter F3), kde boli zahrievané z izbovej teploty na 600 °C pri rýchlosti ohreву 10 °C/min. Po dosiahnutí tejto teploty sa analyzátor nechal samovoľne vychladnúť. Testovali sa dve množstvá kyslíka v atmosfére: 0 % (pyrolýza) a 21 % (spaľovanie), čo sú extrémne hodnoty, ktoré sa môžu vyskytnúť v reálnom spaľovacom zariadení. Výsledné spaliny s rozptýlenými jemnými časticami boli vedené z TGA do zariadenia TSI-SMPS (Model 3080-Series Electrostatic Classifiers vrátane CPC 3775, TSI Inc.). Výhodou tejto laboratórnej experimentálnej metódy je skutočnosť, že celý prúd spalín prechádza meracou aparatúrou a sú identifikované všetky emitované častice. (Sitek, 2021)

Je dôležité vyvinúť metódy na experimentálnu charakterizáciu alternatívnych palív, ktoré vykazujú tak odlišné vlastnosti v porovnaní s tradičnými palivami. V skutočnosti by sa obvyklé termogravimetrické (TG) analýzy mali používať iba na predbežnú charakterizáciu.

Experimentálne zariadenia a technické riešenia vykonávajúce prevádzkové podmienky viac podobné tým v praktických aplikáciách (vysoká teplota, vysoká rýchlosť ohrevu, nízka doba zotrvania) sú vhodnejšie na poskytnutie základných údajov pre optimalizáciu parametrov a vlastností paliva pre veľké systémy. (Biagini, 2004)

Ďalšia práca (Ryu, 2006) experimentálne skúma spaľovanie štyroch materiálov biomasy s rôznymi vlastnosťami paliva v pevnom lôžku za podmienok bohatých na palivo. Krivky teploty, zloženia spalín a úbytku hmotnosti identifikovali dve odlišné periódy v priebehu spaľovania v lôžku: šírenie vznietenia a oxidáciu uhlíka. Účinky objemovej hmotnosti, veľkosti častíc a rýchlosti prúdenia vzduchu na charakteristiky spaľovania počas dvoch období sa interpretujú pomocou rýchlosti čela zapaľovania, rýchlosti horenia, percenta straty hmoty, pomeru ekvivalencie a teplotného gradientu.

Systém od (Hazman, 2023) pozostáva z piatich hlavných komponentov, ktorými sú vstup paliva, skrutkový podávač, ventilátor, spaľovacia komora a spalínové potrubie. V tejto práci sa práškové biopalivo zo škrupín kokosových orechov dodávalo prostredníctvom vstupného zásobníku. Ďalej závitkový podávač funguje tak, že prepravuje palivo v potrubí a potom je fúkané ventilátorom, ktoré funguje ako primárny vzduch.

Účinok modelu odstránenia prchavosti na správanie častíc uhlia sa podrobne skúmal vykonaním numerických simulácií jednoduchého prúdového plameňa práškového uhlia

vytvoreného malým prúdovým horákom. (Hoshimoto, 2012) Pri iných typov reaktorov sa využil horák pre podrvené pevné palivo, ale umiestnený na vrchu reaktora a orientovaný nadol. Päť druhov uhlia rozomletých na prášok a spálilo v skúšobnom zariadení s turbulentným spaľovaním v peci, ktoré malo horák na vrchu a potrubie na chladenie plynu s dvomi odberovými otvormi na boku v blízkosti dna. (Furuzono, 2017)

Vo viacerých publikáciách (Biagini, 2005), (Dacombe, 1999) (Turrado, 2018) sa na testovanie rôznych palív v laboratórnych podmienkach využíval spádový rúrkový reaktor (The drop tube reactor). Spádový rúrkový reaktor je laboratórny reaktor, ktorý sa používa na simuláciu procesov vysokoteplotného spaľovania vrátane tých, ktoré sa vyskytujú pri rôznych typoch spaľovania paliva. Môže sa použiť na štúdium širokého spektra materiálov vrátane palív, ako je uhlie, biomasa alebo aj odpadové materiály. Pozostáva z rúrky vlozenej do vertikálneho elektrického ohrievača s viacerými vykurovacími zónami. DTR pracuje pri atmosférickom tlaku a môže dosiahnuť maximálnu teplotu 1600 °C. Jeho zámerom je simulovať prostredie skutočného termochemického konverzného zariadenia, t. j. splyňovača, spaľovacieho zariadenia, pece alebo všeobecne termochemického reaktora. Je možné riadiť podmienky chodu, t.j. teplota, podmienky prúdenia, reakčná kinetika, variácie skúmaných vzoriek atď. Vzorky sa kontinuálne privádzajú do

reaktora, čo môže byť riadené napríklad pomocou gravimetrického dávkovacieho systému.

Do hornej časti reaktora bude privádzaný plyn, resp. oxidačné činidlo, ktoré sú predhrievané. Tok plynov je možné regulovať. V spodnej časti bude možný odber produktov spaľovania pre následnú analýzu emisií, TZL, atď.

Jeden z výstupov v práci od (Biagini C. T., 2005) je graf teplotného profilu vo vnútri reaktoru, ktorý sa meria termočlánkami a súvisí s nominálnou hodnotou indikovanou riadiacim systémom pece. Používal sa tienený termočlánok, aby sa zabránilo interferencii žiarenia z vyhrievaných častí pece, čo umožňuje spoľahlivejšie meranie teploty plynu vo vnútri reaktoru. Rovnaký prietok vzduchu sa udržiaval počas všetkých meraní s menením nominálnej teploty medzi 973 a 1273 K.

Spádový rúrkový reaktor bol použitý aj v práci od (Yang Wu, 2022), kde sa skúmali experimentálne výsledky distribúcie veľkosti, distribúcie anorganických prvkov a zloženia/transformácie anorganických minerálov v tuhých časticiach vznikajúcich pri spaľovaní tuhého odpadu.

1.2 Literárny prehľad vplyvov rôznych faktorov na produkciu TZL

1.2.1 Všeobecne

Tvorba sadzí, organických častíc a popolových častíc sa mení v závislosti od podmienok spaľovania, vlastností paliva a typu spaľovacieho zariadenia. Sadze a organické častice pochádzajú zo spaľovateľného materiálu, zatiaľ čo popolové častice vznikajú z obsahu popola v palive. Biomasové palivá majú rôzny obsah popola a rôznorodé zloženie popola, vrátane ľahko vyprchávajúcich prvkov ako draslík, síra, chlór, sodík a zinok. To môže viesť k vysokým emisiám, najmä emisiám jemných častíc, ako aj k prevádzkovým problémom. Jemné častice ($< 1 \mu\text{m}$) vznikajú z ľahko vyprchávajúcich anorganických prvkov, ktoré sa počas spaľovania uvoľňujú z biomasových palív do plynnej fázy. Draslík, síra a chlór sú najrelevantnejšími prvkami počas spaľovania biomasových palív. (Obaidullah, 2018).

1.2.2 Veľkostné frakcie

V rúrkovej spádovej peci, laboratórnom reaktore simulujúcom podmienky spaľovania podrveného paliva, sa vykonáva drvenie biomasy na menšie častice ovplyvňuje emisie tuhých znečisťujúcich látok (TZL). Experimenty v reaktore ukázali, že zatiaľ čo menšie častice biomasy vo všeobecnosti zlepšujú vyhorenie a znižujú celkové koncentrácie TZL, ovplyvňuje sa aj zloženie anorganických TZL. Rozhodujúce je, že prchavé prvky ako draslík (K) a chlór (Cl) sa koncentrujú v jemných časticách

bez ohľadu na pôvodnú veľkosť častíc, čo poukazuje na ich pretrvávajúci príspevok k tvorbe TZL (Lopes, 2016).

1.2.3 Teplota

Vplyv teploty na emisie TZL je komplexný a závisí od fázy spaľovania a typu paliva:

- Počas vyprchávania emisie TZL vo všeobecnosti klesajú s rastúcou teplotou, no sú výnimky s výraznými nárastmi pri 1100 °C (pravdepodobne v dôsledku tavenia prvkov a nukleácie) a tiež pri 600 °C (kvôli neúplnému spaľovaniu). Vyššie koncentrácie kyslíka pri nižších teplotách vedú k zníženiu emisií.
- Počas spaľovania uhlíka sa vplyv teploty líši: pri niektorých typoch biomasy je minimálny, zatiaľ čo pri iných sa emisie TZL s rastúcou teplotou lineárne zvyšujú. Celkovo je často pozorovaný rastúci trend emisií TZL s teplotou, hoci sa objavujú aj anomálie (Chen Wang, 2022).

1.2.4 Vzduch / čas zdržania

Výsledky ukázali, že veľké množstvo jemných častíc sa vytvorilo pri najkratšom čase zotrvania, čo možno vysvetliť tvorbou vysokého množstva sadzí v plameni. Avšak dve hodnoty hmotnostnej koncentrácie získané pri 0,53 s a 1,11 s vykazovali rovnaké výsledky (Zhou, 2022).

V štúdií sa pozorovalo, ako vplyv doby zdržania závisí od typu paliva. Ukázalo sa, že pri dvoch rôznych typoch paliva a dvoch

rôznych časoch zdržania boli rozdielne hodnoty nameraných jemných častíc v spalínach (Tsuyoshi Takuwa, 2006).

Dva časy zdržania Rt1 (0,9 s) a Rt2 (1,5 s) sa porovnávali pri spaľovaní uhlia a biomasy. Vplyv času zdržania na celkové množstvo TZL mala rovnaké hodnoty ako štandardná odchýlka merania. Množstvo jemných častíc je mierne vyššie pri dlhšom čase zdržania pre uhlie. Avšak pre biomasu je trend opačný, kedy pri dlhšom čase zdržania boli zaznamenané nižšie hodnoty TZL (Zellagui, 2017).

Po zvýšenom čase zotrvania častíc (štyrikrát dlhší na základe priemerného času zotrvania častíc) sa významné znížili hodnoty TZL pozorované pri meraniach (G. Nugraha, 2021).

1.2.5 Vlhkosť

Priamo sa skúmalo, ako zvyšujúci sa obsah vlhkosti v palive ovplyvňuje účinnosť spaľovania a emisné faktory znečisťujúcich látok vrátane TZL. Štúdie zvyčajne ukazujú, že vyšší obsah vlhkosti vedie k zvýšenému obsahu TZL v dôsledku nedokonalého spaľovania (Garg, 2021).

Štúdie o spaľovaní biomasy v spádovej rúrkovej peci často uvádzajú znížené emisie PM z vysušených palív (s nižšou vlhkosťou) v porovnaní so surovou biomasou. To implicitne zdôrazňuje negatívny vplyv vyššieho obsahu vlhkosti na TZL. Tiež sa štúdiá zaoberala tým, ako vlhkosť ovplyvňuje uvoľňovanie Cl a S, ktoré sú spojené s anorganickými TZL (Shah, 2018).

1.3 Vplyvy rôznych faktorov na produkciu sadzí – simulácie

1.3.1 Veľkostné frakcie

Menšie častice paliva majú tendenciu produkovať menej sadzí vďaka vyššiemu pomeru povrchu k objemu, čo uľahčuje úplnejšie spaľovanie a znižuje tvorbu prekursorov sadzí. Naopak, väčšie častice môžu viesť k nedokonalému spaľovaniu, čo zvyšuje tvorbu sadzí (Tian, 2023).

Brillard a kol. (2023) vykonali numerické simulácie spaľovania častíc uhlia v rúrkovej peci. Ich zistenia naznačili, že väčšie častice vykazovali vyššiu tvorbu sadzí v dôsledku dlhších časov spaľovania a menej účinných oxidačných procesov.

Niektoré štúdie naznačujú, že menšie častice môžu viesť k nižším množstvám sadzí, ak podmienky umožňujú úplnú oxidáciu, zatiaľ čo iné ukazujú, že rýchle uvoľňovanie prchavých látok z malých častíc v podmienkach bohatých na palivo môže zvyšovať tvorbu sadzí (Yi, 2014) (Zheng, 2024).

1.3.2 Teplota

Vyššie teploty vo všeobecnosti vedú k rýchlejšiemu odparovaniu práškových častíc paliva, čím sa uvoľňuje viac prchavých uhľovodíkov, ktoré sú prekursorami sadzí. To môže spočiatku viesť k vyššej rýchlosti nukleácie sadzí a rastu povrchu.

Štúdia Denga a kol. (2024) skúmala tvorbu sadzí počas rýchlej pyrolýzy modelových komponentov biomasy v rúrkovej peci pri

vysokých teplotách. Výskum preukázal, že produkcia sadzí sa zvyšuje s teplotou v dôsledku zvýšených rýchlostí pyrolýzy, ale poznamenal, že veľmi vysoké teploty môžu viesť k zvýšenej oxidácii sadzí, čím sa znižuje celkové množstvo sadzí (Zheng L. S., 2020).

1.3.3 Vzduch / čas zdržania

Prietok vstupného vzduchu je kľúčový pre riadenie stechiometrie, miešania a času zotrvania v peci, čo všetko priamo ovplyvňuje tvorbu sadzí a oxidáciu. Ak je čas zdržania príliš krátky, aj pri dobrom miešaní a vysokých teplotách nemusí byť dostatok času na prebehnutie celej sekvencie odparovania, spaľovania a úplnej oxidácie sadzí, čo môže viesť k zvýšenému množstvu nespáleného uhlíka a sadzí (Noor, 2020).

Niekoľko štúdií založených na CFD a experimentálnych meraniach preukázalo, že zníženie prietoku spaľovacieho vzduchu môže viesť k zvýšenej tvorbe sadzí, predovšetkým v dôsledku predĺženého času zotrvania častíc paliva a zvýšeného rastu prekursorov sadzí (Xu, 2021) , (Abhijeet, 2024). Nižší prietok vzduchu môže obmedziť dostupnosť kyslíka, čo podporuje nedokonalé spaľovanie a uľahčuje rast a aglomeráciu častíc sadzí na povrchu.

1.3.4 Vlhkosť

Niekoľko štúdií ukázalo, že obsah vlhkosti v palive významne ovplyvňuje tvorbu sadzí počas spaľovania biomasy. Zatiaľ čo vysoké hladiny vlhkosti sú vo všeobecnosti spojené so zníženým množstvom sadzí v dôsledku nižších teplôt

spaľovania a zvýšenej oxidácie, niektoré výskumy naznačujú, že zníženie obsahu vlhkosti môže tiež znížiť emisie sadzí zlepšením účinnosti spaľovania a obmedzením tvorby ťažkých dechtových zlúčenín (Rizqi Fitri Naryanto, 2020), (Mulky, 2018). Simulácie CFD ukazujú, že zvýšený obsah vlhkosti znižuje teplotu plameňa a môže zvýšiť množstvo nespáleného uhlíka. Toto zníženie teploty zhoršuje oxidáciu sadzí. Štúdia uvádza, že so zvyšujúcou sa vlhkosťou sa znižuje teplota plameňa a zvyšuje sa podiel nespáleného uhlíka, čo sú podmienky podporujúce vyšší obsah sadzí (Kurose, 2001).

2 TÉZY DIZERTAČNEJ PRÁCE

- Uskutočniť analýzu paliva a procesu horenia pri spaľovaní TAP pri rôznych podmienkach spaľovania.
- Navrhnuť experimentálne zariadenia pre výskum vplyvu rôznych podmienok spaľovania na tvorbu TZL.
- Uskutočniť experimentálne meranie produkcie TZL na navrhnutom experimentálnom zariadení pri rôznych podmienkach spaľovania.
- Vytvoriť model spaľovania TAP.
- Optimalizovať podmienky spaľovania pri produkcii TZL pri spaľovaní TAP na základe experimentálnych výsledkov.
- Analyzovať dosiahnuté výsledky z experimentálnych meraní.

3 METODIKA RIEŠENIA

Metodika pozostávala z laboratórnych experimentov v dvoch režimoch: statickom a kontinuálnom spaľovaní v spádovej rúrkovej peci. Merania koncentrácií TZL boli realizované pri rôznych teplotách, vlhkosti, veľkostných frakciách a prietoku vzduchu. Súčasne bol vytvorený CFD model spaľovania v ANSYS Fluent na simuláciu tvorby sadzí. Experimenty a simulácie boli navzájom porovnané. V tabuľke sú zhrnuté kroky.

Tabuľka 1 Zhrnutie krokov výskumu

Krok č.	Fáza	Primárny cieľ	Kľúčové metódy/Premenné
1	Analýza vzoriek paliva	Charakterizácia základných vlastností paliva	CHNS, TGA, Kalorimetria (9 vzoriek TAP, 1 biomasa)
2	Analýza statického spaľovania	Posúdenie správania sa spaľovania a emisií tuhých znečisťujúcich látok v rôznych atmosférach	TGA + TSI, variabilná spaľovacia atmosféra

3	Kontinuálne spaľovanie (rúrková spádová pec)	Skúmanie faktorov ovplyvňujúcich tuhé znečisťujúce látky v rôznych podmienkach; spoluspaľovanie	Variabilná veľkosť častíc paliva, teplota, vlhkosť, prietok vzduchu; spoluspaľovanie s uhlím, mäsovokostnou múčkou, drvenými pneumatikami, kalom z čistiarní odpadových vôd
4	Numerické modelovanie	Výpočtová analýza mechanizmov tvorby sadzí	CFD simulácie ANSYS Fluent
5	Validácia a optimalizácia	Overenie modelu a optimalizácia parametrov spaľovania	Porovnanie numerických a experimentálnych výsledkov; optimalizácia podmienok v peci

4 DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY

Preukázalo sa, že zníženie veľkostných frakcií paliva vedie k významnému zníženiu TZL, čo je pripísané zvýšenej ploche pre spaľovanie a efektívnejšiemu vyhorenia organických a anorganických zostatkov. Zníženie obsahu vlhkosti v palive taktiež konzistentne viedlo k nižším emisiám TZL, čo potvrdzuje dôležitosť predsušenia paliva pre lepšiu účinnosť spaľovania. Naopak, zníženie prietoku vzduchu (a tým predĺženie doby zdržania) viedlo v experimente k zníženiu TZL, čo je v protiklade s numerickými predikciami sadzí a poukazuje na komplexné interakcie v heterogénnom prostredí.

Kľúčovou súčasťou práce bolo numerické modelovanie spaľovania TAP pomocou CFD simulácií v ANSYS Fluent. Bol vytvorený a kalibrovaný model s využitím modelu turbulencie $k-\omega$, diskrétného fázového modelu (DPM) a modelu tvorby sadzí Moss Brookes. Tento model umožnil vizualizáciu teplotných profilov, trajektórií častíc a hmotnostného podielu prchavých látok, čím poskytol hlbší pohľad na dynamiku spaľovacieho procesu. Porovnanie simulačných a experimentálnych výsledkov ukázalo, že hoci model úspešne predpovedal tvorbu sadzí v závislosti od vlhkosti a teploty (s lineárnym nárastom sadzí pri zvýšení teploty), pri vplyve veľkostných frakcií a prietoku vzduchu sa objavili značné rozdiely medzi predikciami sadzí a nameranými celkovými TZL. Tieto rozdiely sú kľúčové

pre pochopenie obmedzení súčasných modelov sadzí pri komplexných, heterogénnych palivách a naznačujú potrebu zahrnutia širšieho spektra mechanizmov tvorby TZL.

Výskum spoluspaľovania TAP s inými palivami (mäsovokostná múčka, uhlie, guma, kal z čistiarní odpadových vôd) priniesol cenné poznatky o synergických a antagonistických efektoch. Pri spoluspaľovaní s MKM a uhlím sa potvrdil pozitívny vplyv na zníženie TZL, najmä pri optimálnych pomeroch. V prípade gumy a kalu boli pozorované nelineárne a komplexné závislosti, ktoré podčiarkujú vplyv špecifického zloženia a prítomnosti anorganických zložiek na tvorbu TZL.

4 PRÍNOS PRE ĎALŠÍ ROZVOJ VEDY A PRE PRAX

Prínos pre vedu a výskum:

- Rozšírenie vedeckého poznania v oblasti spaľovania tuhých alternatívnych palív a mechanizmov tvorby tuhých znečisťujúcich látok v laboratórnych podmienkach.
- Získanie rozsiahleho súboru experimentálnych dát o vplyve kľúčových prevádzkových parametrov (teplota, vlhkosť, veľkosť častíc, prietok vzduchu) a spoluspaľovania na emisie TZL z TAP.
- Vývoj a verifikácia numerického modelu spaľovania TAP, ktorý predstavuje základ pre ďalší vývoj komplexnejších simulačných nástrojov v oblasti emisií z heterogénnych palív.
- Identifikácia diskrepancií medzi numerickými predikciami sadzí a experimentálnymi meraniami celkových TZL, ktorá otvára nové smery pre budúci výskum a zdokonaľovanie simulačných modelov.

Prínos pre prax:

- Poskytnutie cenných informácií a odporúčaní pre optimalizáciu prevádzkových podmienok priemyselných spaľovacích zariadení, čo môže viesť k

znížení emisí TZL při spařování tuhých alternativních palív.

- Návod pre operátorov spařovacích procesov, ako efektívne riadiť parametre ako vlhkosť a veľkosť častíc paliva s cieľom zlepšiť spařovanie a minimalizovať environmentálny dopad.
- Zlepšenie pochopenia správania rôznych zmesí palív pri spoluspařovaní, čo umožňuje racionálnejší výber palivových zmesí pre priemyselné aplikácie.

5 RESUMÉ V ANGLICKOM JAZYKU

This dissertation comprehensively investigates the factors influencing the formation of particulate matter (PM) emissions during the combustion of refuse-derived fuel (RDF). In the context of growing environmental concerns and efforts towards sustainable energy solutions, the energy utilization of RDF presents a promising avenue, though SPM emissions require detailed analysis. The research combined detailed fuel characterization and extensive experimental studies (static and continuous combustion, impact of temperature, moisture, particle size, airflow, and co-combustion) with numerical modeling using ANSYS Fluent software. A key aspect was the validation of simulation results with experimental data. The work confirmed that reduced moisture and smaller RDF particle sizes significantly decrease PM emissions. Complex dependencies were also identified during co-combustion. Comparisons between experiments and simulations revealed discrepancies, clarifying the limitations of soot models in predicting total PM from heterogeneous fuels and pointing to directions for future research. The study aimed to quantify PM emissions and propose effective strategies for combustion optimization. Its contribution lies in advancing knowledge, providing practical recommendations for industry, and enriching pedagogical activities in energy and environmental engineering.

Zoznam použitej literatúry

ANSYS Fluent Theory Guide. (dátum neznámy).

Abhijeet, A. (2024). Soot Reduction in Coal Fired Boilers: A Reaction Kinetics Study Using a Detailed Reaction Mechanism for Coal Combustion and Pah and Soot Formation. *Raj, Abhijeet and Khator, Aditya, Soot Reduction in Coal Fired Boilers: A Reaction Kinetics Study Using a Detailed Reaction Mechanism for Coal Combustion and Pah and Soot Formation. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4958252> or <http://dx.doi.org>.*

Alain Brillard, P. G.-F. (2023). Numerical Simulation of the Combustion of a Coal Char Particle Spherically Shrinking in a Drop Tube Furnace. *applied sciences*.

Amaral, C. C. (2015). An Overview of Particulate Matter Measurement Instruments.

analyzatoryspalin.sk. (2013). <https://analyzatoryspalin.sk/spalovanie/>. Dostupné na Internete: analyzatoryspalin.sk.

Bapat. (2016). ADVANCED FUEL BURNING TECHNOLOGIES IN CEMENT PRODUCTION. *Indian Cement Review*.

BARRIE JENKINS, P. M. (2023). *INDUSTRIAL AND PROCESS FURNACES Principles, design and operation*. Susan Dennis.

Biagini, C. T. (2005). Development and characterization of a lab-scale entrained flow reactor for testing biomass fuels . *Fuel*.

Biagini, F. T. (2004). Characterization of devolatilization of secondary fuels in different conditions. *Combustion Science and Technology*.

Bundschuh. (2013). *Technologies for Converting Biomass to Useful energy*. Sustainable Energy Developments.

Chen Wang, C. K. (2022). Effect of Varying Temperature and Oxygen on Particulate Matter Formation in Oxy-Biomass Combustion. *Energy Engineering*.

Conesa, R. E. (2011). Pollutant formation and emissions from cement kiln stack using a solid recovered fuel from municipal solid waste. *Environ. Sci. Technol.* .

Dacombe, P. W. (1999). Combustion-induced fragmentation behavior of isolated coal particles. *Fuel*.

Deng, W. (2020). Mechanistic insights into effect of feeding rate on soot formation during rapid pyrolysis of biomass model components in a

- drop-tube furnace at high temperature. *Proceedings of the Combustion Institute*.
- ec.europa.eu. (2023). *Municipal waste statistics*. Dostupné na Internet: ec.europa.eu.
- Efika, O. W. (2015). Products from the high temperature pyrolysis of RDF at slow and rapid heating rates. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*.
- Furuzono, N. F. (2017). Behavior of selenium in the flue gas of pulverized coal combustion system: Influence of kind of coal and combustion conditions. *Fuel Processing Technology*.
- G. Nugraha, H. S. (2021). Particulate Matter Reduction in Residual Biomass Combustion. *Energies*.
- Garg, T. R. (2021). Effect of moisture content and fuel type on emissions from vegetation using a steady state combustion apparatus. *International Journal of Wildland Fire*.
- Gary, Y. (2010). Municipal solid waste to energy conversion processes.
- gbsgroup. (dátum neznámy). *Tuhé alternatívne palivo (TAP)*. Dostupné na Internet: gbsgroup.sk: <http://gbsgroup.sk/tuhe-alternativne-palivo-tap/>
- Grzegorz Gałko, I. M. (2022). Evaluation of alternative refuse-derived fuel use as a valuable resource in various valorised applications. *Energy*.
- Hampp, J. (2011). Development of a Drop Tube Reactor to Test and Assist a Sustainable Manufacturing Process. *Advances in Sustainable Manufacturing*.
- Hamzah, Z. T. (2017). Woody biomass characterization for 100 megawatt-hours(MW) power generation. *Energy Procedia*.
- Hasselriis, L. (1995). Analysis of heavy metal emission data from municipal waste combustion. *Journal of Hazardous Materials*.
- Hazman, I. N. (2023). Combustion of Pulverized Coconut Shell in Lab-Scaled Incinerator Rig using CFD. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*.
- Helga, K. H. (2020). BIELA KNIHA ENERGETICKÉHO ZHODNOCOVANIA ODPADOV V SLOVENSKEJ REPUBLIKE.
- Hoshimoto, K. S. (2012). Numerical simulation of pulverized coal jet flame employing the TDP model. *Fuel*.
- Hroncová. (2017). Malé častice v ovzduší – veľké riziká pre zdravie. *Životné prostredie*.

- Ineco. (2014). *Odborné stanovisko Analýza vhodnosti použitia ZKO pre výrobu TAP v zariadení na zhodnocovanie odpadov v lokalite Horný Hričov, Dolný Hričov. Banská Bystrica.*
- J.-K. Zhuo, S.-Q. L. (2009). The progressive formation of submicron particulate matter in a quasi one-dimensional pulverized coal combustor. *Proceedings of the Combustion Institute.*
- Jaworek, J. S. (2011). *International Conference of Electrostatic Precipitation.*
- Jimenez, L. R. (2009). Short-term impact of particulate matter (PM2.5) on daily mortality among the over-75 age group in Madrid (Spain). *Science of the Total Environment.*
- Johari, M. A. (2014). Combustion characteristics of refuse derived fuel (RDF) in a fluidized bed combustor. *Engineering, Environmental Science.*
- Jones, H. (2016). Emission of ultrafine particles from the incineration of municipal solid waste: A review. *Atmospheric Environment.*
- Junák, Š. (2015). Zneškodňovanie a zhodnocovanie odpadov. Nebezpečné odpady. *Odpadové hospodárstvo.*
- Kahawalage, M. T. (2023). Opportunities and challenges of using SRF as an alternative fuel in the cement industry. *Cleaner Waste Systems.*
- Kant, S. (2022). FACTORS AFFECTING THE PERFORMANCE OF DRY ELECTROSTATIC PRECIPITATOR: A REVIEW. *International Journal of Innovative Science & Technology.*
- Kopp, F. S. (1997). Coal properties and their influence on air activation. *Carbon.*
- Kothari, T. P. (2010). Waste-to-energy: A way from renewable energy sources to sustainable development.
- Kurose, T. M. (2001). Effects of moisture in coal on pulverized coal combustion characteristics. *Fuel.*
- Kuspangaliyeva, B. S. (2021). *Thermogravimetric Study of Refuse Derived Fuel Produced from Municipal Solid Waste of Kazakhstan.*
- LADOMERSKÝ, H. S. (2012). *Odpadové inžinierstvo: environmentálne vhodné energetické*. Zvolen.
- Lopes. (2016). Effect of Particle Size on the Burnout and Emissions of Particulate Matter from Biomass Combustion in a Drop Tube Furnace. *Thesis to obtain the Master of Science Degree in* .
- M.M.Hasan, M. M. (2021). Energy recovery from municipal solid waste using pyrolysis technology: A review on current status and developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*

- Ma, R. (2008). Overview on the Chlorine Origin of MSW and Cl-Originated Corrosion During MSW & RDF Combustion Process. *Bioinformatics and Biomedical Engineering*.
- Mateus, N. C. (2022). Modern Kiln Burner Technology in the Current Energy Climate: Pushing the Limits of Alternative Fuel Substitution. *fire*.
- Md. Obaidullah, S. B. (2018). An Overview of PM Formation Mechanisms from Residential Biomass Combustion and Instruments Using in PM Measurements. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY and ENVIRONMENT*.
- Mohanna. (2020). COMBUSTION OF PULVERIZED BIOMASS IMPACT OF FUEL PREPARATION AND FLOW CONDITIONS.
- Molek. (2017). <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/pyrolyza-princip-historie-a-soucasnost>. Dostupné na Internete: oenergetice.cz.
- Mulky, N. (2018). Computational study of the effects of density, fuel content, and moisture content on smoldering propagation of cellulose and hemicellulose mixtures. *Proceedings of the Combustion Institute*.
- NEUWAHL, C. B. (2019). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration.
- Niemelä, M. K. (2022). Experimental and numerical analysis of fine particle and soot formation in a modern 100 MW pulverized biomass heating plant. *Combustion and Flame*.
- Noor, H. S. (2020). CFD Analysis on the Effects of Different Coal on Combustion Characteristics in Coal-fired Boiler. *CFD Letters*.
- Nugraha, S. H. (2021). Particulate Matter Reduction in Residual Biomass Combustion. *energies*.
- Obaidullah, B. D. (2018). An Overview of PM Formation Mechanisms from Residential Biomass Combustion and Instruments Using in PM Measurements. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY and ENVIRONMENT*.
- Offertálerová. (2013). Tuhé znečisťujúce látky a spôsob ich odstraňovania zo životného prostredia. *enviroportal.sk*.
- Ozgen, C. G. (2015). Factors governing particle number emissions in a waste-to-energy plant. *Waste Management*.
- Pio, T. T. (2020). Co-gasification of refused derived fuel and biomass in a pilot-scale bubbling fluidized bed reactor. *Energy Conversion and Management*.
- Potočár. (2023). *Ubudlo komunálneho odpadu. Štatistický úrad ukázal nové čísla za rok 2022*. Dostupné na Internete: odpady-portal.sk.

- R. Cossu, R. S. (2018). Waste input to landfills. In *Solid waste landfilling*. Elsevier.
- Rimár, K. K. (2021). Energy Treatment of Solid Municipal Waste in Combination with Biomass by Decentralized Method with the Respect to the Negative Effects on the Environment. *Sustainability* 2021.
- Rizqi Fitri Naryanto, H. E. (2020). The Effect of Moisture Content on the Tar Characteristic of Wood Pellet Feedstock in a Downdraft Gasifier. *applied sciences*.
- Ryu, Y. K. (2006). Effect of fuel properties on biomass combustion: Part I. Experiments—fuel type, equivalence ratio and particle size. *Fuel*.
- Saeed, M. A. (2015). Agricultural waste pulverised biomass: MEC and flame speeds. *J. Loss Prev. Process Ind.*
- sako.cz. (2021). *Energetické využití odpadu*. Dostupné na Internetu: (<https://www.sako.cz/probrnaky/cz/801/energeticke-vyuziti-odpadu>).
- Shah, M. (2018). Torrefaction: Upgrading Biomass to "Green Coal". *Agriculture and Natural Resources*.
- Silvergas. (dátum neznámy). <http://www.silvergas.sk/technologie.html>. Dostupné na Internetu: silvergas.sk.
- Šindler. (2016). *quark*. Dostupné na Internetu: <https://www.quark.sk/kraska-co-spaluje/>.
- Sitek, P. P. (2021). Thermogravimetric analysis of solid biomass fuels and corresponding emission of fine particles. *Energy*.
- Sun, I. R.-S. (2015). Influence of simulated MSW sizes on the combustion process in a fixed bed: CFD and experimental approaches. *Waste Management*.
- Sun, W. G. (2023). CFD Simulation and Experimental Study on a Thermal Energy Storage—Updraft Solid Waste Gasification Device. *energies*.
- Tian, W. S. (2023). Numerical Modelling of Pulverised Coal Combustion. *Handbook of Multiphase Flow Science and Technology*.
- Tissari. (2008). Fine Particle Emissions from Residential Wood Combustion. *Environmental Science*.
- Tsuyoshi Takuwa, I. S. (2006). Mechanisms of fine particulates formation with alkali metal compounds during coal combustion. *Fuel*.
- Turrado, A. F. (2018). Carbonation of Fine CaO Particles in a Drop Tube Reactor. *Industrial & Engineering Chemistry Research*.
- Tursunov, A. (2019). A comprehensive study on municipal solid waste characteristics for green energy recovery in Urta-Chirchik: A case study of Tashkent region. *Materials Today: Proceedings*.

- Versteeg, H. K. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Pearson Education. (A foundational text for finite volume methods used in Fluent).
- Voldsund, G. L.-C. (2019). Comparison of Technologies for CO₂ Capture from Cement Production—Part 1: Technical Evaluation. *Energies*.
- Wang W., W. L. (2019). Emission reduction of particulate matter from the combustion of biochar via thermal pre-treatment of torrefaction, slow pyrolysis or hydrothermal carbonisation and its co-combustion with pulverized coal.
- Wang, D. M. (2018). Characteristics of filterable and condensable particulate matter emitted from two waste incineration power plants in China. *Science of the Total Environment*.
- Wilcox, D. C. (1998). *Turbulence Modeling for CFD*. DCW Industries. (The definitive book on turbulence modeling, including the k-omega model).
- Wolny-Koladka, M. Z. (2020). Impact of Calcium Oxide on Hygienization and Self-Heating Prevention of Biologically Contaminated Polymer Materials. *Materials*.
- Xu, J. L. (2021). Experimental study on soot characteristics of laminar co-flow ethylene diffused flame under air atmosphere. *E3S Web of Conferences*.
- Yan, Z. W. (2016). Preliminary study of PM_{2.5} formation during municipal solid waste incineration.
- Yang Wu, P. G. (2022). Particulate matter emission during MSW/RDF/WW combustion: Inorganic minerals distribution, transformation and agglomeration. *Fuel Processing Technology*.
- Yang, P. G. (2021). An overview of inorganic particulate matter emission from coal/biomass/MSW combustion: Sampling and measurement, formation, distribution, inorganic composition and influencing factors. *Fuel Processing Technology*.
- Yang, P. G. (2022). Particulate matter emission during municipal solid waste combustion: Submicron particulates formation mechanism. *Fuel*.
- Yang, P. G. (2022). Particulate matter emission during municipal solid waste combustion: Submicron particulates formation mechanism. *Fuel*.
- Yi, Z. M. (2014). Effect of the particle size on combustion characteristics of pulverized coal in an O₂/CO₂ atmosphere. *Fuel Processing Technology*.
- Yinon. (2010). Ultrafine particle emissions: Comparison of waste- to-energy with coal- and biomass-fired power plants.

- Zellagui, G. T.-M.-F. (2017). Parametric study on the particulate matter emissions during solid fuel combustion in a drop tube furnace. *Fuel*.
- Zhang. (1997). EMISSIONS FROM WASTE COMBUSTION. *Doctoral Dissertation*.
- Zhang, S. G. (2019). Socioeconomic factors and regional differences of PM2.5 health risks in China. *Journal of Environmental Management*.
- Zheng, D. X. (2024). Simulation of Soot Formation in Pulverized Coal Combustion under O₂/N₂ and O₂/CO₂ Atmospheres. *Atmospheres*.
- Zheng, L. S. (2020). Simulation of Turbulent Combustion in a Large Pulverized Coal Boiler Based on Turbulent Radiation Interaction and the Modified Soot Model. *ACS Omega*.
- Zhou, M. R. (2022). Submicron particle formation from co-firing of coal and municipal sewage sludge.
- ZOHŽO. (2021). *Zhodnocovanie – materiálové a energetické*.

Zoznam publikovaných prác doktoranda

- [1] Potenciál využitia vodíka v kombinovanej výrobe tepla a elektriny = Potential of using hydrogen in combined heat and power / Šrámková, Michal [Autor, 50%] ; Ďurčanský, Peter [Autor, 50%]. – [recenzované]. In: *Technológ* [textový dokument (print)] [elektronický dokument] . – Žilina (Slovensko) : Žilinská univerzita v Žiline. – ISSN 1337-8996. – ISSN (online) 2730-0501. – Roč. 14, č. 4 (2022), s. 45-48 [tlačaná forma] [online]

- [2] Influence of combustion conditions and sample characteristics on Particulate Matter emissions formation from Refused Derived Fuel / Šrámka, Michal [Autor, 25%] ; Nosek, Radovan [Korešpondenčný autor, 10%] ; Holubčík, Michal [Autor, 10%] ; Kapjor, Andrej [Autor, 25%] ; Čajová Kantová, Nikola [Autor, 10%] ; Martauz, Pavel [Autor, 10%] ; Sochr, Jozef [Autor, 10%] ; International conference on Environment and renewable energy, 11 [21.02.2025-23.02.2025, Da Nang, Vietnam (predtým Vietnamská demokratická republika)]. – [recenzované]. – DOI 10.1051/e3sconf/202562403003. – SCO. In: *11th International conference on Environment and renewable energy* [elektronický dokument] / Chiang, P. C. [Zostavovateľ, editor]. – 1. vyd. – Les Ulis (Francúzsko) : Édition Diffusion Presse Sciences, 2025. – (E3S Web of Conferences, ISSN 2267-1242, ISSN 2555-0403 ; Vol. 624), s. [1-10] [online]
- [3] ID: 1253145 | Numerická simulácia ohrevu vzduchu v elektricky ohrievanej rúrkovej peci / Šrámka, Michal (Korešpondenčný autor) (34%) ; Nosek, Radovan (Autor) (33%) ; Lenhard, Richard (Autor) (33%) ; Konferencie užívateľů Ansys 2024, 27 [29.05.2024-31.05.2024, Zaječí, Česko]. In: *Konferencie užívateľů Ansys 2024* [elektronický

dokument] : sborník konference / Sošková, Iva [Zostavovateľ, editor] ; Paulas, Richard [Recenzent] ; Hanulák, Patrik [Recenzent] ; Kubák, Jindřich [Recenzent] ; Plešinger, Jaroslav [Recenzent]. – 1. vyd. – Praha (Česko) : Praha TechSoft Engineering, 2024. – ISBN (elektronické) 978-80-907196-5-1, s. [1-7]

- [4] ID: 1278215 | Analysis of different factors impact on particulate matter formation during the refused derived fuels combustion / Nosek, Radovan (Autor) (30%) ; Šrámka, Michal (Autor) (40%) ; Čajová Kantová, Nikola (Autor) (30%) ; SGEM 2024, 24 [01.07.2024-07.07.2024, Albena, Bulharsko]. – [recenzované]. – DOI 10.5593/sgem2024/4.1/s19.61. – SCO. In: *SGEM 2024 conference proceedings* (4.1.), (Energy and Clean Technologies) [elektronický dokument] / Trofymchuk, Oleksandr [Zostavovateľ, editor] ; Baiba, Rivza [Zostavovateľ, editor]. – st. vyd. – Sofia (Bulharsko) : STEF92 Technology Ltd., 2024. – ISBN 978-619-7603-71-2, s. 467-474 [online]
- [5] ID: 1130540 | Potential of using hydrogen in combined heat and power / Šrámka, Michal (Autor) (34%) ; Ďurčanský, Peter (Autor) (33%) ; Nosek, Radovan (Autor) (33%). – [recenzované]. In: *Advances in Thermal Processes and Energy*

Transformation [elektronický dokument] . – Prešov (Slovensko) : Energetická konzultačná agentura. – ISSN 2585-9102. – Roč. 5, č. 1 (2022), s. 13-17 [online]

- [6] Peter Durcansky, Lucia Macakova, Radovan Nosek, Michal Sramka: Local energy storage as an important part of the energy community. *Renewable Energy Focus*, 6/2025, v recenznom konaní

- [7] Research into Factors Influencing the Formation of Particulate Matter Emissions in a Drop Tube Furnace, Results in Engineering Michal Sramka, Radovan Nosek, Michal Holubčík, Andrej Kapjor, Pavel Martauz, Jozef Sochr, v recenznom konaní