



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

VLIV PROVOZNÍCH PARAMETRŮ SPALOVACÍHO PROCESU NA KONCENTRACI JEMNÝCH ČÁSTIC VE SPALINÁCH BIOMASOVÝCH KOTLŮ

IMPACT OF OPERATION PARAMETERS ON FINE COMBUSTION
PARTICLES CONCENTRATION IN THE FLUE GAS OF BIOMASS BOILERS

TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Ján Poláčik

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2020

KLÍČOVÁ SLOVA

Jemné častice, biomasa, spaľovanie, emisie

KEY WORDS

Fine particles, Biomass, Combustion, Emissions

MÍSTO ULOŽENÍ ORIGINÁLU DIZERTAČNÍ PRÁCE

Areálová knihovna Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně
Technická 2896/2, 616 69 Brno

OBSAH

OBSAH.....	3
ÚVOD.....	5
1 JEMNÉ ČASTICE.....	6
1.1 Princíp vzniku spaľovacích častíc.....	6
1.2 Rozdelenie častíc vzniknutých spaľovaním.....	6
1.3 Legislatíva, emisné a imisné limity jemných častíc.....	7
1.4 Vplyv parametrov spaľovania biomasy na tvorbu jemných častíc	7
2 EXPERIMENTÁLNE MERANIA	8
2.1 Automatické spaľovacie jednotky.....	9
2.2 Krb s ručným prikladaním	11
2.2.1 Vplyv ťahu a nastavenia komínovej klapky.....	13
2.2.2 Vplyv teploty v spaľovacej komore	14
2.2.3 Vplyv teploty terciárneho vzduchu.....	15
2.2.4 Vplyv teploty sekundárneho vzduchu a prúdenia v krbe.....	16
1.1.1 Vplyv geometrie paliva.....	17
3 VYHODNOTENIE DOSIAHNUTÝCH VÝSLEDKOV	18
3.1 Porovnanie automatických spaľovacích zariadení.....	19
3.2 Porovnanie výsledkov manuálneho spaľovacieho zariadenia.....	20
ZÁVER.....	22
ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	23

ÚVOD

Bežnou súčasťou života moderného človeka je okrem iného naplnenie potrieb tepelného komfortu a dostatku elektrickej energie potrebnej ku bežným aktivitám v domácnosti či v priemysle. Pre získanie tepelnej a elektrickej energie dnes bežne využívame spaľovanie biomasy či iných uhlíkových palív. Tu sa dostávame ku otázke vplyvu spaľovania na zdravie človeka a životné prostredie ako také. Je zrejmé, že množstvo respiračných a kožných ochorení má pôvod práve v znečistenom ovzduší. Intenzívnym technologickým pokrokom sa darí sledovať a obmedzovať emisie vznikajúce pri spaľovaní.

Zo začiatku bola v tejto oblasti venovaná pozornosť predovšetkým plynným emisiám. V súčasnej dobe sa do popredia záujmu dostali emisie jemných častíc. Ako jemné častice označujeme drobnú kvapalnú a tuhú frakciu s veľkosťou do 2,5 μm . Pozornosť výskumných pracovísk, v posledných rokoch, priťahujú submikrometrové a ultrajemné častice s veľkosťou do 1 μm , ktoré majú významný vplyv na zdravie človeka. Sú tak malé, že dýchacie cesty človeka ich nezachytia a prenikajú priamo do pľúcnych väčkov dýchacej sústavy, kde dochádza ku okysličovaniu krvi. Ultrajemné častice môžu byť, vďaka aktívnemu povrchu, omnoho nebezpečnejšie ako rovnaká hmotnosť väčších častíc. Mnohí vedci upozorňujú na nutnosť zmeny súčasného spôsobu hodnotenia množstva emisií. Z hľadiska vplyvu na zdravie rozhoduje aktívny povrch, schopnosť častíc viazať na seba toxické látky a prenikať do dolných dýchacích ciest.

Jemné častice, ktorým sa táto práca venuje, vznikajú hlavne kondenzáciou pár uvoľnených počas zahrievania drevnej hmoty. Keďže súčasný trend je taký, že narastá množstvo spaľovanej biomasy, je potrebné počítať s tým, že narastá aj množstvo častíc uvoľnených do atmosféry. Vzhľadom ku zložitosti procesu tvorby a rastu jemných častíc, nie je presne známy vplyv jednotlivých parametrov ovplyvňujúcich horenie biomasy. Preto je dôležité v uvedenej oblasti realizovať potrebný experimentálny výskum, ktorému je venovaná aj predkladaná práca.

Cieľom práce je experimentálne sledovať a hodnotiť vplyv parametrov spaľovania na tvorbu jemných častíc. Našou hypotézou je, že vhodnou kombináciou prevádzkových parametrov je ovplyvniteľná produkcia jemných častíc pri komplexnom zhodnotení spaľovacieho procesu. Výsledky majú pomôcť výrobcem spaľovacích zariadení vhodným konštrukčným zásahom, alebo regulačnými prvkami optimalizovať prevádzkové parametre spaľovacieho procesu tak, aby bola produkcia jemných častíc čo najnižšia. Spotrebitelia spaľovacích zariadení s manuálnou obsluhou môžu v práci nájsť motiváciu pre čistejší spôsob spaľovania biomasy.

Konkrétne ciele dizertačnej práce sú nasledujúce:

- Vypracovanie rešerše o vlastnostiach a tvorbe jemných častíc. Získanie poznatkov o parametroch spaľovacieho procesu, ovplyvňujúcich produkciu jemných častíc v spalínach biomasových kotlov.
- Experimentálne spaľovacie skúšky v laboratórnych a reálnych podmienkach pri rôznych prevádzkových parametroch.

- Stanovenie vplyvu čiastkových parametrov na tvorbu jemných častíc (vlastnosti paliva, množstvo kyslíka, teplota spaľovacieho procesu a geometria paliva).
- Zhrnutie pozorovaných trendov v produkcii jemných častíc spaľovacím zariadením využívajúcim biomasu ako palivo. Formulácia závislosti jednotlivých parametrov na produkcii častíc.

1 JEMNÉ ČASTICE

Keď hovoríme o jemných časticiach, myslíme tým istú zložku aerosólu nachádzajúceho sa v atmosfére, prípadne v časti spaľovacej jednotky (napríklad v spalínovode), ktorá vznikla napríklad spaľovaním biomasy a je možné ju detegovať dostupnými technológiami. Pojem aerosól sa v obore jemných častíc používa na označenie zmesi častíc, o veľkosti 1 nm – 2,5 μm a nachádzajúcich sa v tuhom, kvapalnom, alebo zmiešanom stave, rozptýlených v plyne (v atmosfére). Jednotlivé častice sa odlišujú najmä veľkosťou, tvarom, chemickým zložením a merným povrchom (pórozitou).

Častice rozptýlené v atmosfére spôsobujú ochladzovanie Zeme takým spôsobom, že absorbujú a rozptyľujú slnečné žiarenie. Tomuto efektu hovoríme Albedo efekt. Jemné častice zároveň pôsobia ako kondenzačné jadrá pre tvorbu oblačnosti. Vodná para nachádzajúca sa v atmosfére kondenzuje na jemných časticiach. Tento efekt sa nazýva CCN (Cloud Condensation Nucleus). Veľkosť a chemické zloženie počiatočných kondenzačných jadier (napr. antropogénne sírany, dusičnany, prach, organický uhlík a čierny uhlík) majú veľký význam pri aktivácii a rýchlosti rastu kvapôčok oblaku [1], [2].

1.1 PRINCÍP VZNIKU SPAĽOVACÍCH ČASTÍC

Spaľovanie biomasy je spojené s tvorbou jemných častíc nachádzajúcich sa v spalínach. Ich tvorba závisí od vlastností paliva (vlhkosť, zrnitosť, materiál, ...), typu spaľovacieho zariadenia, ale hlavne od podmienok spaľovania. Kľúčovými faktormi pri spaľovaní sú čas zotrvania v spaľovacej komore, teplota procesu spaľovania, turbulencie a množstvo kyslíka. Pri spaľovaní paliva dochádza ku vyparovaniu prchavého podielu horľaviny. Ide o organické zlúčeniny s rôznymi hodnotami parciálnych tlakov. Po dosiahnutí bodu sýtosti začína tvorba novej fázy. Nazývame to proces nukleácie. Molekuly sa zhlukujú do ultrajemných častíc o veľkosti do 0,1 μm. Vzniknuté častice môžu ďalej narastať mechanizmom koagulácie (zhlukovanie koloidných a makromolekulárnych organických častíc do väčších celkov), aglomeráciou (vzájomným spájaním na základe lepivosti povrchov), oxidáciou alebo reakciami kondenzácie na povrchu častíc.

1.2 ROZDELENIE ČASTÍC VZNIKNUTÝCH SPAĽOVANÍM

Častice, ktoré vznikli za vysokých teplôt v spaľovacej komore, nazývame primárne častice. Tie, ktoré sa sformovali v dymovej vlečke a v atmosfére nazývame sekundárne častice [3], [4]. Primárne častice delíme podľa mechanizmu ich vzniku

na sadze, organické častice a popolček. Podľa prchavosti sa vzniknuté organické zlúčeniny rozdeľujú na prchavé organické zlúčeniny (*volatile organic compounds*, VOC) a polo-prchavé organické zlúčeniny (*semi-volatile organic compounds*, SVOC).

Uhlíkové častice rozdeľujeme na dva základné typy - elementárny uhlík (Elemental carbon – EC) a organický uhlík (Organic carbon - OC). EC, nazývaný aj čierny uhlík je nízko reaktívny uhlíkový materiál, ktorý vznikol nedokonalým spaľovaním organických látok, fosílnych palív alebo biomasy. Tiež vzniká emisiami z áut. Jeho schopnosť oxidovať začína až pri značne vyšších teplotách, než je bežná teplota spaľovacieho procesu [5]. Podľa mnohých výskumov, vďaka schopnosti pohlcovať svetlo ohrieva Zem a považuje sa za najdôležitejšiu časticovú súčasť globálneho otepľovania [6]. Účinky EC na zdravie človeka môžu byť negatívne, pretože má schopnosť viazať niektoré toxické organické zlúčeniny a zachytáva aj kovy [7].

OC je uhlík, ktorý sa nachádza voľne v prírode, ale vzniká aj priamo pri spaľovaní uhlíkových plyných látok. Na rozdiel od BC obsahuje iba čiastočne frakciu, ktorá absorbuje svetlo [8]. Je preto schopný viac rozptyľovať svetelné žiarenie [9]. Pomer množstva BC a OC určuje otepľovací, resp. ochladzovací efekt aerosólov v atmosfére vznikajúcich spaľovaním biomasy. V porovnaní s elementárnym uhlíkom môže byť OC priamo uvoľnený zo zdrojov, ako je primárny organický uhlík a sekundárny organický uhlík, ktoré sa tvoria z produktov atmosférických chemických reakcií prostredníctvom nízkeho tlaku pár, vhodnej teploty a slnečného žiarenia v atmosfére [10].

1.3 LEGISLATÍVA, EMISNÉ A IMISNÉ LIMITY JEMNÝCH ČASTÍC

Imisné hodnoty častíc v ovzduší sú v Českej republike stanovené na základe Zákona o ochrane ovzdušia 201/2012 Sb. a vyhlášky o spôsobe posudzovania a vyhodnocovania úrovne znečistenia 330/2012 Sb. [11]. Žiaľ, pre častice PM₁, ktoré majú nezanedbateľné účinky na ľudský organizmus, na úrovni Európskej únie neexistujú limitné hodnoty určené legislatívou. Je to najmä z dôvodu náročnosti detekcie častíc a obmedzeného počtu staníc, ktoré by dokázali koncentráciu častíc merať. Imisný limit pre častice PM_{2,5} je od roku 2020 stanovený na 20 µg.m⁻³ [12].

1.4 VPLYV PARAMETROV SPAĽOVANIA BIOMASY NA TVORBU JEMNÝCH ČASTÍC

Dizertačná práca uvádza niekoľko vedeckých záverov rôznych pracovísk, ktoré mapujú vplyv vybraných parametrov spaľovania na produkciu jemných častíc [13]. Autori skúmali vplyv povrchu a tvaru vzorky paliva [14], vplyv chemických vlastností [15], závislosť na atmosfére spaľovania [16], [17]. Nakoniec porovnávali jednotlivé typy spaľovacích zariadení [18]. Z týchto výsledkov vyplýva, že produkcia jemných častíc je premenlivá a hlavne závislá od uvedených parametrov. Výrazne závisí hlavne od prítomnosti množstva vzduchu pri spaľovaní, ako aj od emisnej triedy použitého kotla.

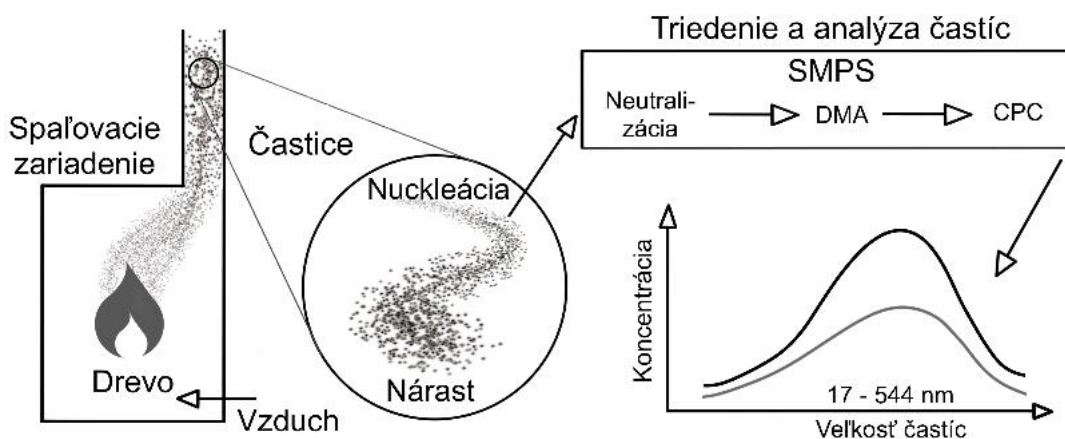
Ďalej sú v dizertačnej práci uvedené výsledky autorov publikujúcich hmotnostnú bilanciu produkovaných častíc. Tí uvádzajú špecifické druhy spaľovaných energetických plodín, a porovnávajú produkciu jemných častíc [19]. Tu sa dostávame do bodu, kedy je hmotnosť častíc určená buď priamo zo zachytenej hmotnosti na impaktore, alebo z identifikovaného počtu a veľkosti častíc. V druhom prípade je potrebné z koncentrácie jemných častíc určiť ich hmotnosť.

2 EXPERIMENTÁLNE MERANIA

Experimentálne merania prebehli na pracovisku Energetického ústavu FSI, VUT v Brně. Pre detailné pochopenie procesov odohrávajúcich sa pri teplotnom ovplyvnení biomasy boli využité laboratórne podmienky, kde sa v prvej fáze spaľovali malé vzorky dreva v prístroji pre termogravimetrickú analýzu. Tu sa sledoval pokles hmotnosti danej vzorky a zároveň produkcia jemných častíc v priebehu riadeného ohrevu vzorky.

Ďalej boli realizované experimenty na reálnych spaľovacích zariadeniach v kotolni. Spaľované boli vzorky dreva rôzneho materiálu a vlastností. Odoberali sa a analyzovali vzorky spalín pre identifikáciu prítomných jemných častíc. V nasledujúcom texte sú uvedené jednotlivé metódy meraní a prístrojové vybavenie, ktoré bolo využité pre získanie výsledkov tejto dizertačnej práce.

Odber a analýza jemných častíc, vo veľkostnom rozsahu do 550 nm, prebiehali podľa schémy na obrázku 1. Z rešeršnej časti dizertačnej práce vyplýva, že jemné častice v závislosti na koncentrácií, teplote a ďalších podmienkach podliehajú procesu nukleácie a koagulujú [20], takže je mnoho faktorov, ktoré ovplyvňujú výsledné meranie. Snahou ale bolo čo najpresnejšie určiť závislosť tvorby jemných častíc vzhľadom na podmienky, v ktorých pri spaľovacom procese vznikajú.



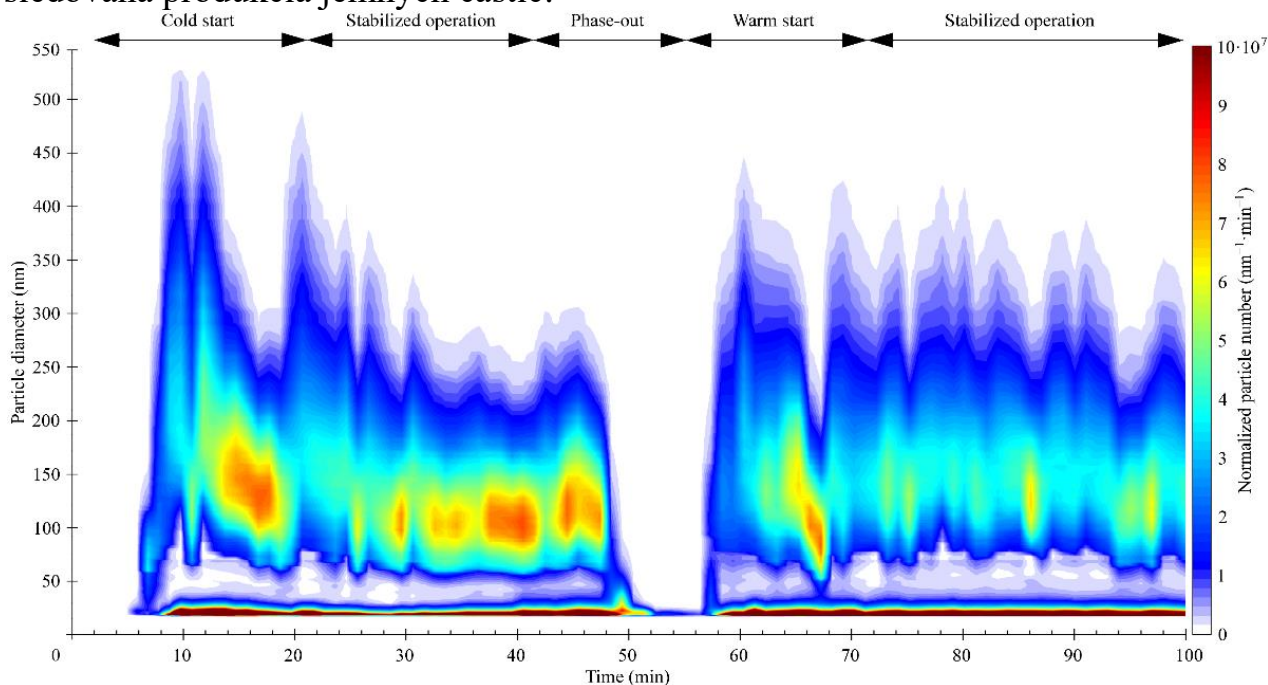
Obr. 1 Schéma odberu a analýzy jemných častíc produkovaných spaľovacím zariadením

Pravidlá pre odber jemných častíc sú určené príslušnými normami. Norma ČSN EN 13284, s názvom Stacionárne zdroje znečisťovania. Stanovenie nízkych hmotnostných koncentrácií tuhých znečisťujúcich látok, určuje metódy stanovenia tuhých znečisťujúcich látok pre stacionárne zdroje emisií. Táto norma sa venuje

manuálnym gravimetrickým metódam, ako aj automatizovaným meracím systémom. Ďalej je to norma EN 13229 s názvom Vstavané spotrebiče na vykurovanie a krbové vložky na pevné palivá - Požiadavky a skúšobné metódy. Táto norma zavádza kritériá pre jednotlivé skúšobné metódy na spaľovacích jednotkách. Norma EN 303-5, s názvom Vykurovacie kotly na tuhé palivá s ručným a automatickým prikladaním paliva s menovitým výkonom do 500 kW. Terminológia, požiadavky, skúšanie a označovanie, ďalej definuje limitné hodnoty prachu pre jednotlivé emisné triedy kotlov na tuhé palivá určené na ústredné kúrenie [21]. Tieto normy boli využité pre návrh odberových tratí pre meranie emisií jemných častíc.

2.1 AUTOMATICKÉ SPAĽOVACIE JEDNOTKY

Experimenty prebiehali na zariadeniach Ekoscroll Alfa, Verner a Gemos, čo sú automatické kotle s kontinuálnym dodávaním paliva. Pri týchto zariadeniach boli však naše merania a odbery jemných častíc súčasťou iných experimentov prebiehajúcich na pracovisku Energetického ústavu, preto nie vždy bolo možné realizovať komplexné meranie s dostatočným množstvom spaľovacích skúšok pri rôznych parametroch. Merania jemných častíc na spaľovacom zariadení Ekoscroll Alfa prebiehali s cieľom posúdiť vplyv rôznych druhov spaľovaných peliet a vplyvu teploty spaľovacej komory a vnútorných plôch kotla na formovanie jemných častíc. Zároveň, počas vybraných spaľovacích skúšok dochádzalo aj ku optimalizácii metodiky odberu spalín na filter pre ich následnú analýzu (rýchlosť odberu na filter 1,5 l na minútu pomocou prístroja CPC). Počas celého spaľovacieho procesu bola sledovaná produkcia jemných častíc.

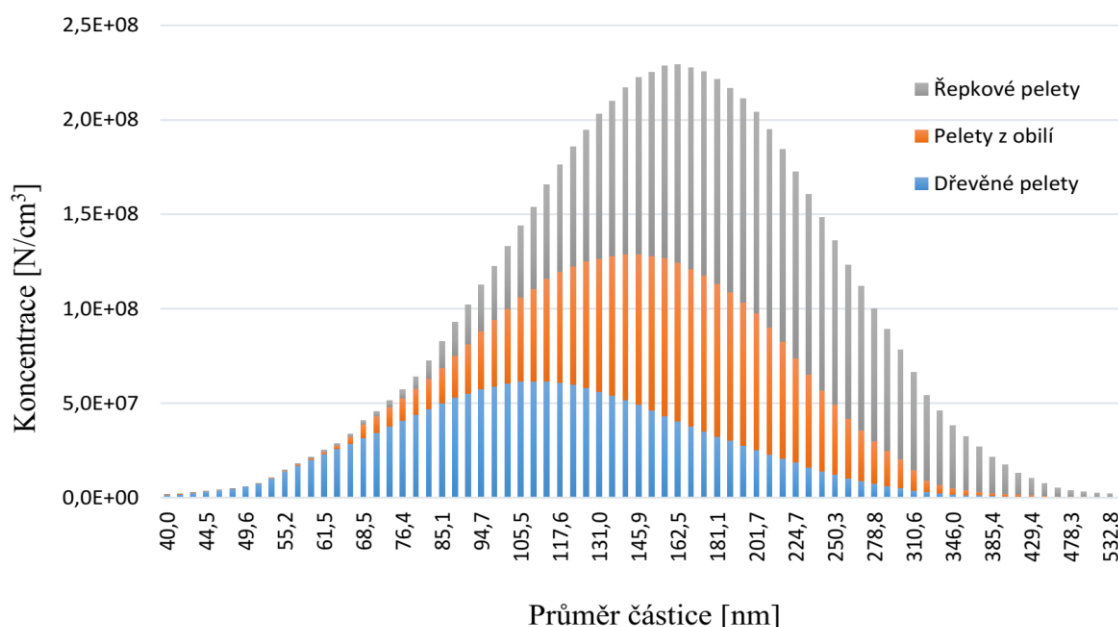


Obr. 2 Priebeh koncentrácie a veľkostnej distribúcie jemných častíc v spalinách automatického kotle pre agro-peleť (hore) a smrekové peleť (dole).

Boli testované dva druhy paliva: agro-peleť, prevažne z rastliny pohánkovec japonský (*Latinsky: Reynoutria*), a peleť smrekového dreva. Kotel bol naštartovaný

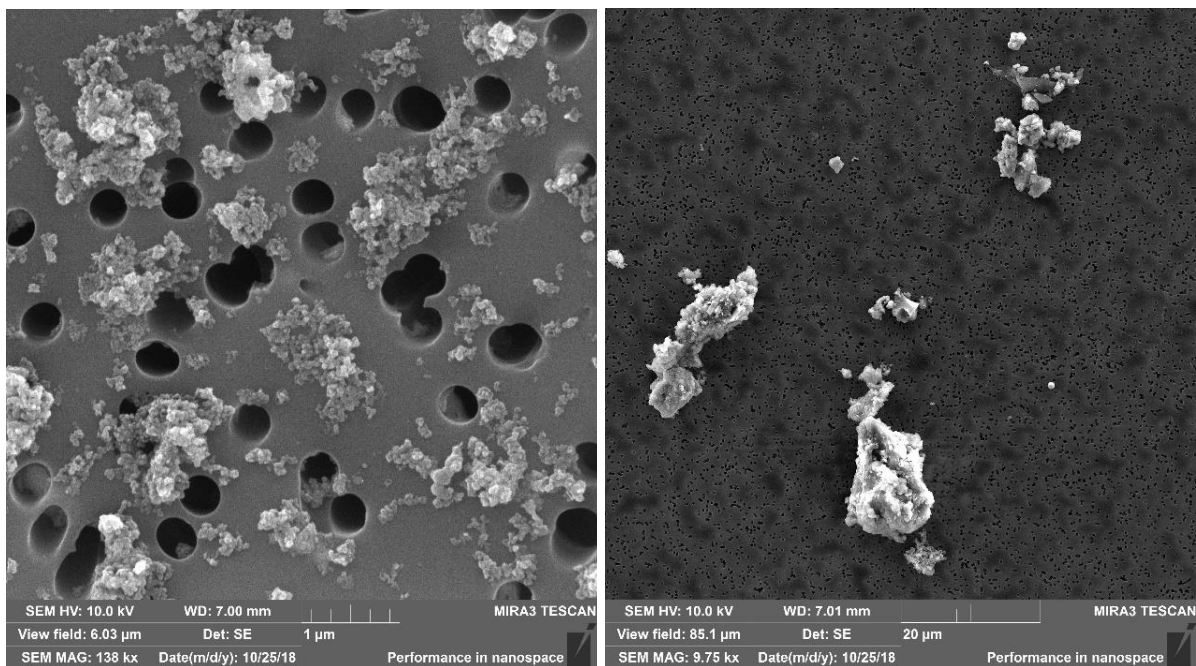
zo studeného stavu, kedy teplota spaľovacej komory bola rovná teplote okolia. Výstupom je koncentračná mapa jemných častíc zachytávajúca studený a teplý štart kotla, spoločne so stabilnou prevádzkou. Produkcia a koncentrácia jemných častíc sa menila v závislosti na teplote v spaľovacej komore. Pri štarte vznikalo väčšie množstvo častíc, ako tomu bolo pri stabilnej prevádzke automatického kotla.

Tepl vodný kotol českého výrobcu Verner bol využitý pre meranie veľkostnej distribúcie jemných častíc v spalinách pre 3 druhy paliva: repkové pelety, drevené pelety a pelety z obilia. Merania pribiehali pri výkone kotla v rozmedzí 28-30 kW a obsahu kyslíka v spalinách okolo 8 %. Po rozhoření kotla a vyhriatí na pracovnú teplotu sme merali každé z palív 22 minút. Horenie prebiehalo pri každom type paliva za rôznej teploty. Meraná bola teplota spalín na výstupe zo spaľovacej komory, z ktorej môžeme predpokladať aj rozdielnu teplotu v spaľovacej komore. V prípade spaľovania drevených peliet to bola najnižšia teplota (228 °C na výstupe z kotla). Zároveň i tvorba častíc bola najnižšia. Medzi peletami z obilia a repky bol rozdiel v spaľovacích teplotách iba minimálny.



Obr. 3 Porovnanie priemerných koncentrácií jemných častíc pre rôzne palivá testované na kotle Verner [22]

Z uvedeného vyplýva, že kľúčovým faktorom ovplyvňujúcim množstvo jemných častíc vyprodukovaných pri spaľovaní v automatickom kotle Verner bolo palivo, a jeho vlastnosti, z hľadiska pomeru obsahu popoloviny ku horľavine. Zo skúseností s obsluhou tohto automatického kotla vieme povedať, že pri pohľade do spaľovacej komory dochádza, pri palivách s vyšším obsahom popoloviny, ku „zapekaniu“ na horáku, inak povedané ku zhoršeniu podmienok prúdenia vzduchu a horenia práve z dôvodu nahromadenia väčšieho obsahu popola v blízkosti horáka. Tento faktor, ako aj samotné zloženie paliva, prispieva ku zvyšovaniu produkcie jemných častíc.



Obr. 4 Ukážka zhlukov častíc vzniknutých pri spaľovaní drevených peliet

2.2 KRB S RUČNÝM PRIKLADANÍM

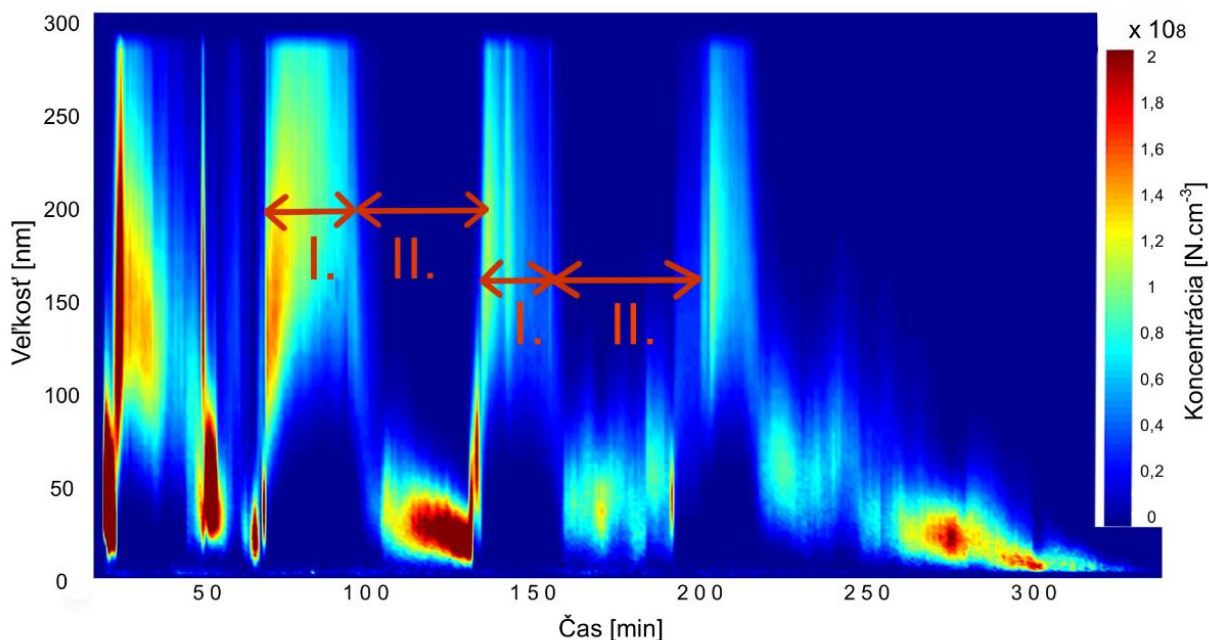
Väčšina spaľovacích testov, s cieľom experimentálne stanoviť vplyv spaľovacích parametrov na tvorbu jemných častíc, prebiehala na spaľovacom zariadení - krbové kachle s ručným prikladaním paliva, od českého výrobcu ABX, model Grönland, špeciálne upraveného pre experimentálne účely. V tomto zariadení bolo spaľované palivo rôzneho druhu, a zároveň boli menené podmienky spaľovania, ako je ťah komína, množstvo vzduchu, teplota v spaľovacej komore, tvar a množstvo paliva. Bolo spaľované kusové drevo, väčšinou bukové. V prúde spalín bolo nainštalovaných niekoľko otvorov pre termočlánky a odbery vzorky spalín.

Každé priloženie paliva, až po jeho dohorenie viditeľným plameňom nazývame cyklus horenia. Začiatok nového cyklu je ovplyvnený predchádzajúcim cyklom tým, že priložené drevo sa rozhorí vďaka tlejúcim uhlíkom z predchádzajúceho cyklu.

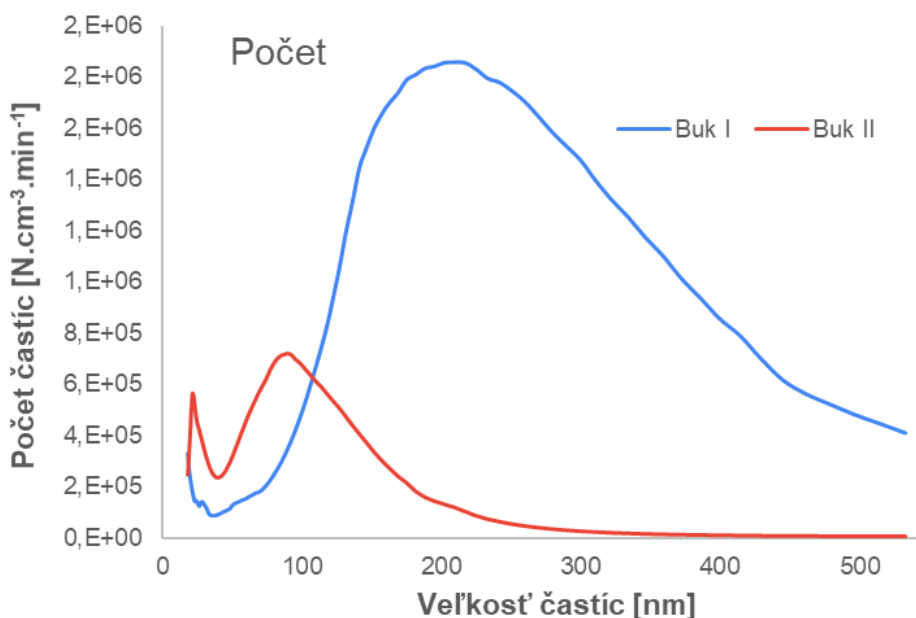
Z hľadiska produkcie jemných častíc, horenie dávky paliva počas jedného cyklu prebiehalo v dvoch významných fázach. Na obrázku 5 je koncentračná mapa s priebehom produkcie jemných častíc. Zľava doprava pozorujeme na začiatku zápal spolu s prvým priložením paliva, určeným pre zahriatie krbu na pracovnú teplotu. Môžeme sledovať zvýšenú produkciu jemných častíc, ovplyvnenú chladnými stenami spaľovacieho zariadenia. Ďalej nasledujú dva celé cykly, v ktorých je v každom označená prvá a druhá fáza I. a II. V prvej fáze dochádza ku intenzívnemu uvoľňovaniu prchavej horľaviny, ktorá ale nestíha dohárať. Nedohorené frakcie sú práve skondenzované uhl'ovodíkové látky, tvoriace veľké množstvo jemných častíc s veľkosťou >150 nm.

Druhá fáza nastáva v momente, kedy sa uvoľnila väčšina prchavej horľaviny, a dochádza ku horeniu tuhého zvyšku. V tejto fáze horí uhlík viazaný v palive, ktorý

nebol uvoľnený vo forme prchavej horľaviny. Prechod z prvej fázy do druhej je pre väčšinu nami spaľovaných palív takmer skokový. V priebehu dvoch minút pozorujeme inú veľkostnú distribúciu častíc o značne nižšej koncentrácii. Na obrázku 6 je zobrazená veľkostná distribúcia pre počet častíc prvej i druhej fázy horenia.



Obr. 5 Koncentračná mapa pri bežnom spaľovaní. I. – prvá fáza spaľovacieho cyklu; II. – druhá fáza spaľovacieho cyklu



Obr. 6 Porovnanie priemernej koncentrácie a hmotnosti jemných častíc za minútu v priebehu prvej a druhej fázy pre bukové drevo

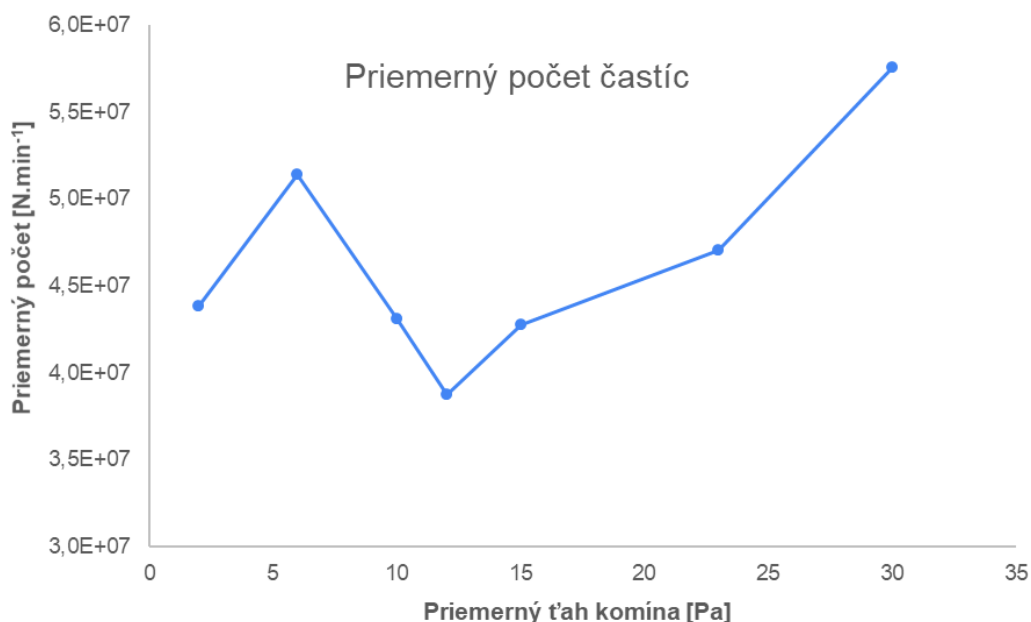
Z týchto diagramov vyplýva, že prvá fáza je charakteristická tvorbou častíc väčších veľkostí, zatiaľ čo v druhej fáze sa tvoria takmer výhradne častice

s veľkosťou do 200 nm. Keď porovnáme veľkostnú distribúciu jemných častíc prvej a druhej fázy z pohľadu ich hmotnosti, vidíme, že celková hmotnosť jemných častíc vzniknutých počas druhej fázy spaľovacieho cyklu je takmer zanedbateľná v porovnaní s hmotnosťou častíc prvého cyklu. Počas prvej fázy dochádza ku intenzívnej koagulácii jemných častíc, a to z dôvodu prítomnosti väčšieho množstva nedohorenej prchavej horľaviny a prítomných uhl'ovodíkových látok, ktoré po prechode do chladnejších častí spalínovodu kondenzujú.

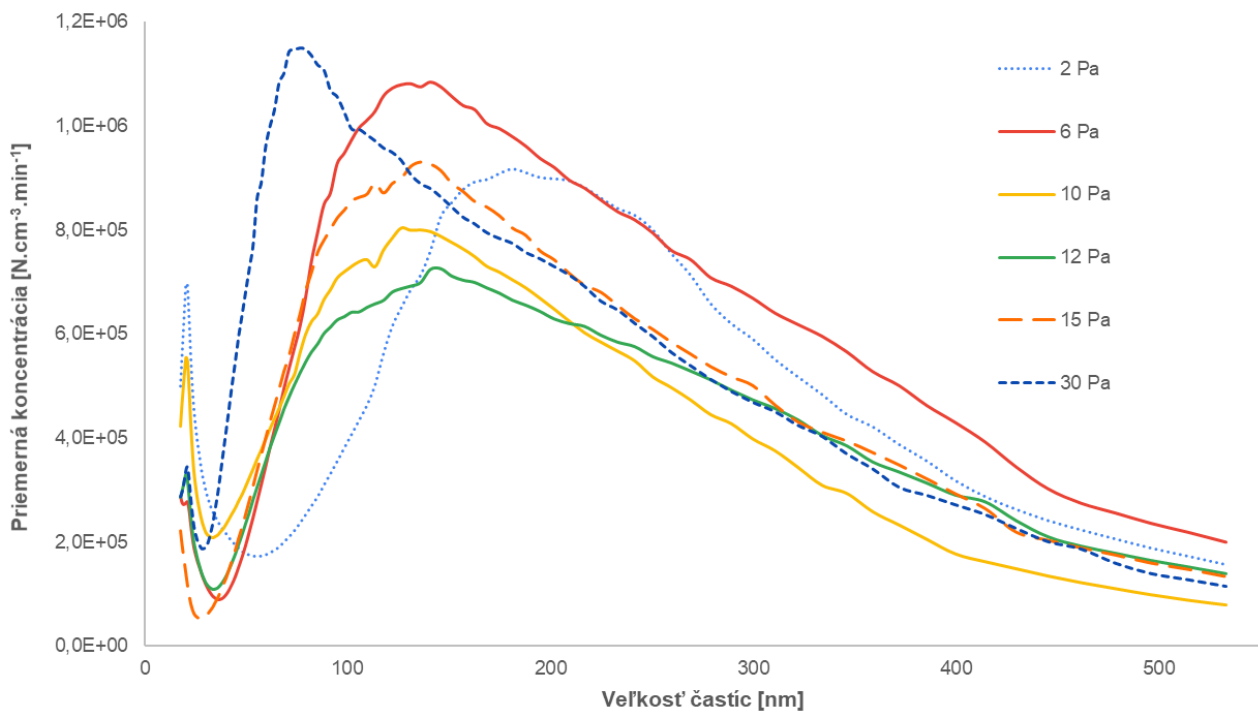
2.2.1 Vplyv ťahu a nastavenia komínovej klapky

Pokiaľ nie je používaný pre odvod spalín spalínový ventilátor, ale využívame prirodzený ťah v komíne, využíva sa pre nastavenie hodnoty ťahu komínová klapka. Tá ovplyvňuje podtlak v komíne. Ťah komína je pre nás kľúčový z hľadiska nastavovania rovnakých podmienok spaľovania pri rôznych meteorologických podmienkach (hlavne pri meniacej sa vonkajšej teplote), aby sme boli schopní dosiahnuť opakovateľnosť meraní. Ťah vplýva na rýchlosť prúdenia a množstvo vzduchu vstupujúceho do spaľovacieho zariadenia. Horenie paliva v spaľovacom zariadení je intenzívnejšie pri vyšších hodnotách ťahu, pretože väčšie množstvo kyslíka v nasávanom vzduchu prispieva ku exotermickým reakciám. Naším zámerom ale bolo overiť, ako rôzne hodnoty ťahu ovplyvňujú koncentráciu jemných častíc v spalínach, ich veľkostnú distribúciu a hmotnosť.

Pre tento experiment sme prikladali vždy rovnaké množstvo paliva (bukové drevo). Namerané výsledky produkcie jemných častíc v závislosti na veľkosti komínového ťahu sú uvedené na obrázkoch 7 a 8.



Obr. 7 Priemerný minútový počet nameraných jemných častíc v závislosti na ťahu komína



Obr. 8 Priemerná minútová veľkostná distribúcia jemných častíc pre spaľovacie s rôznymi hodnotami komínového ťahu

Na obrázku 8 sledujeme veľkostnú distribúciu jemných častíc pre rôzne hodnoty podtlaku v komíne. So zvyšujúcim ťahom sa znižuje priemerná veľkosť jemných častíc v sledovanom rozsahu od 18 do 550 nm. Väčšie častice vznikajú hlavne pri nedostatku kyslíka pre dohorenie prchavej horľaviny, čo sa ukazuje napríklad v prípade podtlaku s hodnotou 2 Pa. Nedohorené frakcie majú väčšiu tendenciu kondenzovať, čiže dochádza ku formovaniu častíc o väčších veľkostiach. Z hľadiska tvorby jemných častíc z výsledkov vyplýva, že práve normou odporúčaná priemerná hodnota podtlaku 12 Pa je opodstatnená. Javí sa výhodné, aby počas horenia paliva v prvej fáze spaľovacieho cyklu bol ťah nastavený na mierne vyšší podtlak v komíne (15 Pa). To ale vedie ku zvýšeniu komínovej straty tepla. Počas druhej fázy je z hľadiska tvorby jemných častíc výhodnejší nižší podtlak (10 Pa).

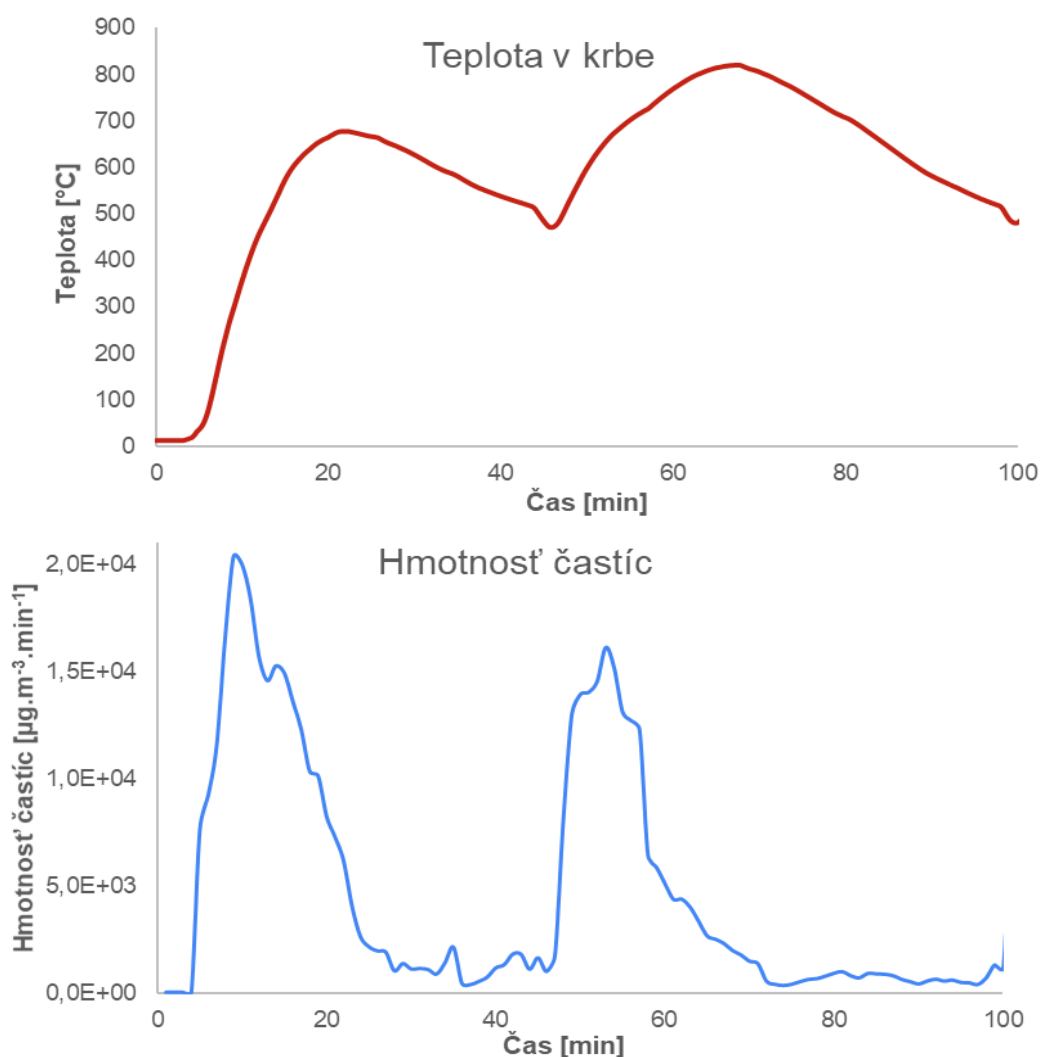
2.2.2 Vplyv teploty v spaľovacej komore

Na základe meraní produkcie jemných častíc pri zapalovaní krbu zo studeného stavu, a pri priložení paliva do vyhriatej spaľovacej komory (studený a teplý štart), vieme určiť vplyv teploty vnútorných plôch spaľovacieho zariadenia s ručným prikladaním na tvorbu jemných častíc. Teplota v krbe bola meraná uprostred dosky z vermikulitu, nachádzajúcej sa v hornej časti ohniska. Priebeh teploty spoločne s hmotnostnou distribúciou jemných častíc je zobrazený v diagramoch na obrázku 9. Teplý štart krbu začal v 44. minúte.

Keďže sme počas tohto experimentu používali rotačnú riedičku, ktorá vyžaduje vyššie prietoky, prístroj SMPS bol v tomto režime schopný merať veľkostnú distribúciu iba do veľkosti častíc 279 nm. Počet jemných častíc, rovnako ako aj ich

hmotnosť pri studenom štarte sú v porovnaní s teplým štartom vyššie v celom meranom veľkostnom spektre.

Potvrďuje sa, že teplota krbu výrazne ovplyvňuje celkovú produkciu jemných častíc. Na studených plochách ohniska dochádza ku rýchlejšiemu zhasínaniu koncov plameňov, horľavé frakcie nedostatočne dohárajú, pri nižších teplotách kondenzujú a vytvárajú častice. Zvýšenie teploty vnútorného prostredia ohniska pomáha tejto horľavine efektívnejšie dohorieť a celkové množstvo jemných častíc uvoľnených do okolitého prostredia spalínovodom je nižšie.



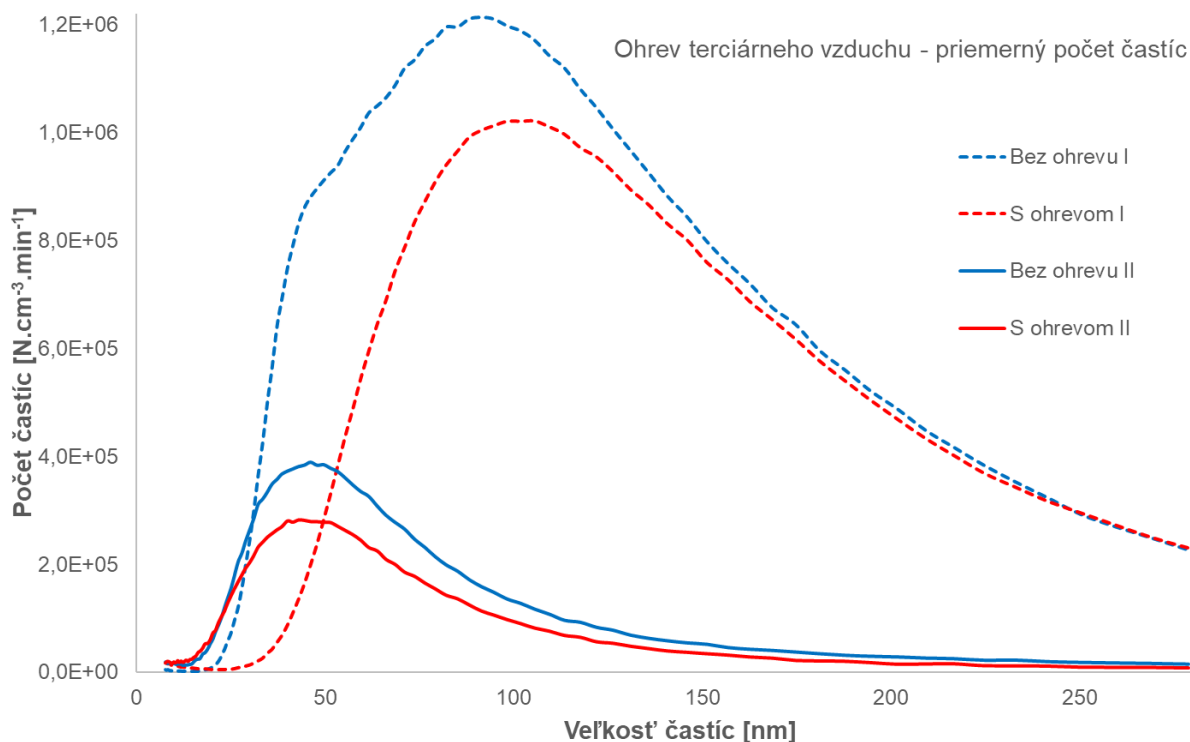
Obr. 9 Priebeh teploty v spaľovacej komore a hmotnosti jemných častíc v závislosti na čase počas studeného a teplého zápalu v krbe. Teplý štart prebiehal od 44. minúty.

2.2.3 Vplyv teploty terciárneho vzduchu

Úlohou privedeného terciárneho vzduchu je podporiť horenie v hornej časti spaľovacej komory, predovšetkým v prvej fáze horenia, kedy primárny a sekundárny vzduch nie je dostatočný pre efektívne dohorenie prchavej horľaviny. V použitom experimentálnom krbe je terciárny vzduch privádzaný zo zadnej časti spaľovacej komory celkovo 8 otvormi a nie je regulovateľný. Predhrieva sa v zadnom plášti

krbu v dutinovom rebrovaní. Keď pozorujeme v ohnisku malé plamienky nad hlavným plameňom, je zrejmé, že plní svoju úlohu a podporuje sekundárne spaľovanie prchavej horľaviny.

Rozhodli sme sa predhrievať terciárny vzduch pomocou horákov so zemným plynom. Nahrievali sme duté profily privarené zvonku na plášť krbu, ktorými prúdi terciárny vzduch. Ich teplota z vonkajšej strany bola po nahriatí okolo 850 °C. Týmto spôsobom nahrievania sa nám podarilo zvýšiť teplotu vstupujúceho terciárneho vzduchu do spaľovacej komory o 100 °C. Sledovali sme vplyv nahrievania terciárneho vzduchu na produkciu jemných častíc a to v prvej i druhej fáze horenia bukového dreva.



Obr. 10 Veľkostná distribúcia jemných častíc bez a s ohrevom terciárneho vzduchu

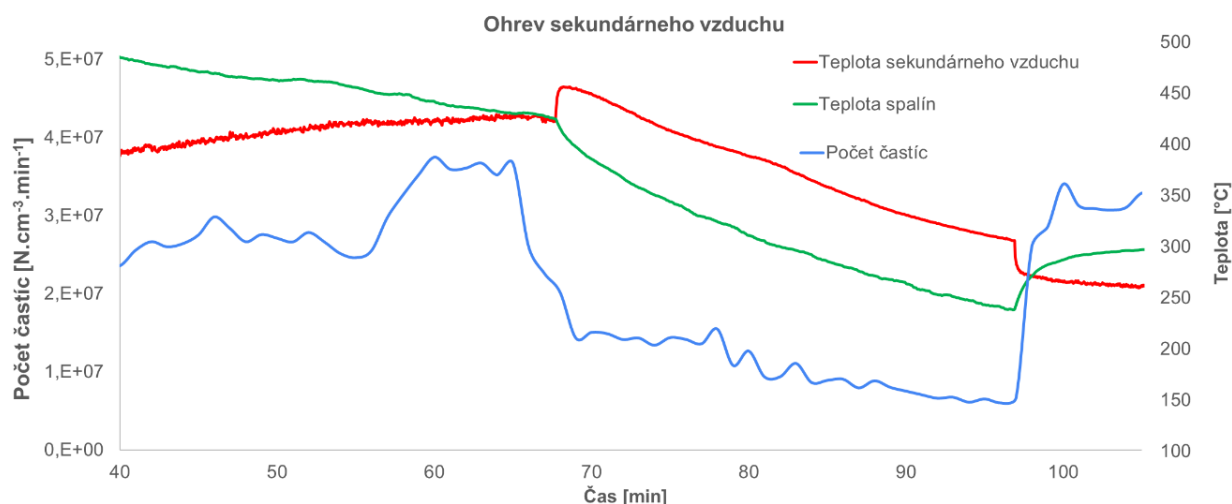
Ohrevom terciárneho vzduchu celková tvorba jemných častíc v emisiách biomasového kotla s ručným prikladaním klesá. Otázkou je však spôsob ohrevu. Naša metóda ohrevu pomocou plynových horákov, aj keď je z hľadiska tvorby jemných častíc účinná, je pri pohľade na spotrebu energie neefektívna. Pokiaľ by výrobcovia spaľovacích zariadení našli vhodný spôsob, ako účinne využiť na ohrev terciárneho vzduchu teplo krbu, môže ohrev terciárneho vzduchu výrazne znížiť celkové emisie jemných častíc.

2.2.4 Vplyv teploty sekundárneho vzduchu a prúdenia v krbe

Bol testovaný vplyv teploty sekundárneho vzduchu privádzaného do ohniska. Vzduch je ohrievaný na hornej klenbe spaľovacej komory, kde teploty dosahujú vysoké hodnoty, až okolo 500 °C. Znížením prietoku vzduchu pomocou regulačného prvku pre ovládanie množstva sekundárneho vzduchu sme znížili jeho množstvo

približne na polovicu. Vzduch má viac času zotrvať v priestore nad hornou klenbou ohniska, čím sa zvyšuje jeho teplota na vstupe. Zároveň sme použili vstavanú dosku pre reguláciu prúdenia v ohnisku, ako je uvedené v kapitole 8.1.2 dizertačnej práce. Dosku sme umiestnili do zvislej polohy, čím sa znížil tepelný prestup cez predné sklo v dvierkach krbu, a zvýšila sa teplota v ohnisku. V tomto experimente sme teda zvýšili celkovú teplotu v krbe a zároveň mierne modifikovali spôsob prúdenia sekundárneho vzduchu do spaľovacej komory. Tento experiment prebiehal v druhej polovici prvej fázy horenia.

Výsledný priebeh teploty sekundárneho vzduchu a celkového počtu nameraných jemných častíc je uvedený na obrázku 11. Teplota sekundárneho vzduchu po znížení jeho privádzaného množstva stúpala (68. – 97. minúta). Zároveň klesla teplota v mieste výstupu spalín do spalínovodu. Je to následok zníženého množstva privádzaného vzduchu do krbu. Znížil sa celkový prietok vzduchu v krbe, prchavá horľavina sa zdržala dlhšiu dobu v ohnisku a mala možnosť efektívnejšie dohorieť, ako aj odovzdať teplo okolitým stenám. Sekundárny vzduch po vstupe do ohniska neprechádza popred sklo, ale vďaka vstavanej doske vo zvislej polohe ide priamo do ohniska.



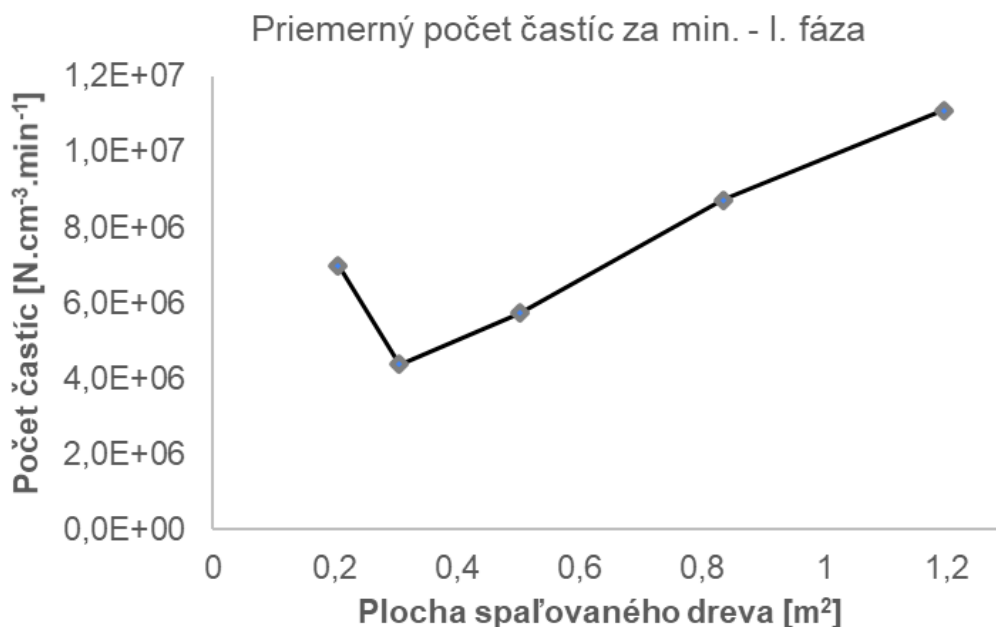
Obr. 11 Vplyv teploty sekundárneho vzduchu na tvorbu jemných častíc

1.1.1 Vplyv geometrie paliva

V rámci riešenia dizertačnej práce bola skúmaná závislosť geometrického tvaru paliva na produkciu jemných častíc. Najbežnejšou praxou spaľovania vo väčšine krbov určených pre domácnosti je prikladať 2 až 4 kusy narezaného dreva rôzneho tvaru a celkovej hmotnosti 2-3 kg s dĺžkou približne 33 cm. Naším cieľom bolo skúmať, ako vplýva rôzne množstvo priložených kusov paliva s rovnakou hmotnosťou na tvorbu jemných častíc. Vyšší počet kusov dreva, pri rovnakej celkovej hmotnosti, znamená, že celková plocha ovplyvnená spaľovacím procesom je väčšia. Spaľovalo sa bukové drevo vždy s podobnou hmotnosťou za cyklus (2,0 – 2,2 kg), narezané v rôznom počte kusov pre každý cyklus.

Záverom porovnania povrchu spaľovaného paliva pri rovnakej celkovej hmotnosti je, že s rastúcim povrchom stúpa aj priemerné množstvo vyprodukovaných častíc za

minútu. Optimálnym počtom priložených kusov sú práve dva, kedy je v porovnaní s ostatnými minimálny celkový počet vyprodukovaných častíc. Hmotnostne sa javí ako najvýhodnejšie priloženie jedného kusu paliva. Treba ale poznamenať, že jeden kus v porovnaní s počtom kusov 32 horel viac než dvojnásobne dlhšie a pri nižšej teplote. Pri jednom kuse zároveň vznikalo vysoké množstvo častíc menších veľkostí už v prvej fáze horenia, čo je dané postupným uvoľňovaním prchavej horľaviny. V prípadoch s vyšším počtom spaľovaných kusov bola táto frakcia uvoľňovaná omnoho rýchlejšie s vyššou koncentráciou. Procesom kondenzácie a koagulácie sa tvorili častice väčších veľkostí, čo môžeme sledovať na ich celkovej hmotnosti.



Obr. 12 Porovnanie priemernej hmotnosti a počtu častíc v jednotlivých fázach za minútu v závislosti na ploche dreva

3 VYHODNOTENIE DOSIAHNUTÝCH VÝSLEDKOV

Na základe vyššie uvedených experimentálne nameraných výsledkov boli určené parametrické závislosti tvorby jemných častíc osobitne pre automatické kotle a pre krb s ručným prikladaním. Každé z meraní prebehlo s určitou presnosťou. Na základe štatistických dát sú zhrnuté čo najpresnejšie výsledky zohľadňujúce vplyv jednotlivých parametrov. Ak porovnáme nami dosiahnuté výsledky so závermi iných, zahraničných autorov, uvedených v rešeršnej časti tejto práce, môžeme konštatovať, že namerané koncentrácie jemných častíc sú vzájomne porovnateľné. Napríklad, autori Weimer a spol. uvádzajú koncentráciu jemných častíc a ďalšie hodnoty pre vybrané druhy drevín. Z ich výsledkov je zrejma koncentrácia jemných častíc produkovaných spaľovacím procesom pri danej fáze horenia. Hodnoty sa pohybujú v rozmedzí $3 \cdot 10^6$ – $1,8 \cdot 10^8$, čo je takisto porovnateľné s našimi nameranými hodnotami [23].

Zo spaľovacích skúšok na automatických spaľovacích jednotkách je zrejmé, že agro-pelety produkovali o niečo viac častíc, než drevené pelety. V porovnaní so spaľovacím zariadením Verner, pri kotle EkoScroll bola produkcia častíc výrazne nižšia. Pre krb s ručným prikladaním nebolo možné jednotlivé trendy veľkostnej distribúcie jemných častíc vyjadriť prehľadne graficky, preto sú uvedené v tabuľke. Na základe celkového počtu a celkovej hmotnosti nameraných jemných častíc je percentuálne vyjadrené, ako zmena jednotlivých parametrov spaľovacieho procesu ovplyvňuje tvorbu jemných častíc v meranom veľkostnom rozsahu. V nasledujúcich kapitolách uvádzame jednotlivé experimentálne zistené trendy pre vybrané parametre.

3.1 POROVNANIE AUTOMATICKÝCH SPAĽOVACÍCH ZARIADENÍ

Pre automatické kotle bol nameraný vplyv teploty spaľovacej komory a vplyv použitého paliva na tvorbu jemných častíc. Keď porovnáme medzi sebou jednotlivé spaľovacie zariadenia, dokážeme určiť trend použitej emisnej triedy kotla. Na základe výhrevnosti jednotlivých peliet môžeme predpokladať trend tvorby jemných častíc v závislosti na použitom palive. Na obrázku 13 vyjadrujeme závislosť početnej veľkostnej distribúcie na jednotlivých parametroch pomocou regresných polynómov 3. stupňa vo forme uvedenej v rovnici 1:

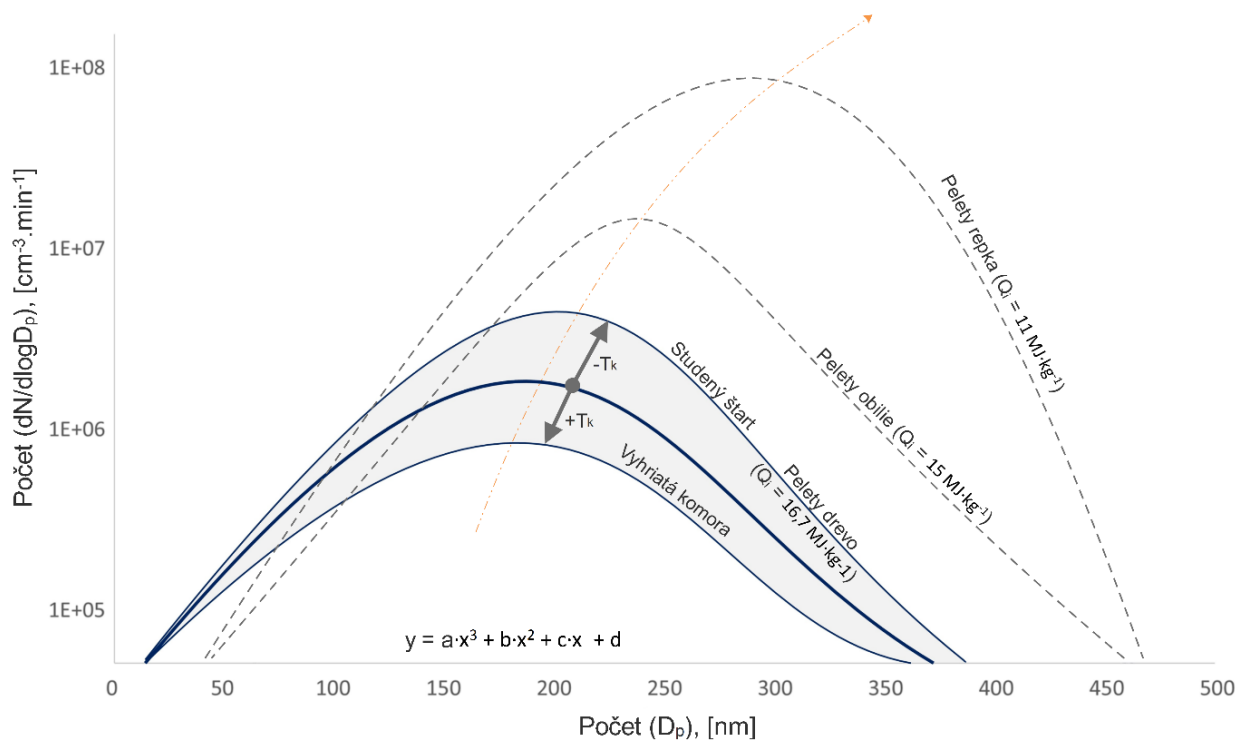
$$y = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d \quad (1)$$

kde y vyjadruje počet nameraných jemných častíc vo veľkostnom rozsahu 18 – 550 nm, a x je veľkosť častíc. Koeficienty a , b , c a d pre drevené, obilné a repkové pelety sú uvedené v tabuľke 1. Hodnotu spoľahlivosti regresnej polynomickej funkcie označujeme R^2 .

Tab. 1 Hodnoty koeficientov a , b , c , d , a R^2 , ktorými sú vyjadrené jednotlivé polynómy

Polynóm y	a	b	c	d	R^2
Pelety drevo	0,1151	-121,81	35594	-2E+06	0,8654
Pelety obilie	0,3287	-368,43	105600	-3E+06	0,5892
Pelety repka	6,1813	-5613,9	1E+06	-3E+07	0,5752

Okrem porovnania veľkostnej početnej distribúcie jemných častíc rôznych druhov palív, naznačujeme trendy distribúcie pri zmene teploty spaľovacej komory. Prerušovanou čiarou je tiež naznačený posun vrcholu pri zvýšení a znížení početnej veľkostnej distribúcie. Pri vyšších koncentráciách sa krivka posúva vpravo smerom ku väčším ekvivalentným priemerom častíc.



Obr. 13 Zobrazenie experimentálne zistených distribučných kriviek jemných častíc pre automatické kotle.

3.2 POROVNANIE VÝSLEDKOV MANUÁLNEHO SPAĽOVACIEHO ZARIADENIA

V spaľovacom zariadení s ručným prikladaním paliva nebolo jednoduché graficky vyjadriť všetky sledované parametre, ako sme uviedli v prípade automatických kotlov. Každý z parametrov, uvedených v kapitole 2, vplyva na tvorbu jemných častíc. V tabuľke 2 je uvedené zhrnutie pozorovaných trendov v produkcii jemných častíc spoločne s percentuálnym vyjadrením zmeny daného parametra.

Uvedené hodnoty prehľadne vyjadrujú vplyv jednotlivých prevádzkových parametrov pri spaľovaní biomasy na tvorbu jemných častíc. Najvýznamnejšou zmenou počas horenia paliva v spaľovacom zariadení s ručným prikladaním kusového dreva je prechod z prvej fázy horenia do druhej v rámci jedného cyklu. Je to prirodzený dej, daný dynamikou spaľovacieho procesu, ktorý nie je ovplyvňovaný užívateľom spaľovacieho zariadenia. Užívateľ môže ovplyvniť parametre ako napríklad geometriu spaľovaného paliva, čo je parameter významne ovplyvňujúci najmä počet vzniknutých jemných častíc. Zníženie ťahu komína z odporúčanej hodnoty 12 Pa na polovicu vedie ku značnému zvýšeniu produkcie jemných častíc, najmä väčších veľkostí.

Ukazuje sa, že zvýšenie teploty spaľovacej komory má značný vplyv na zníženie tvorby jemných častíc. Najvýznamnejší rozdiel z hľadiska teploty je pri studenom a teplom rozháraní priloženého paliva. Pre zníženie produkcie jemných častíc počas spaľovania biomasy je nevyhnutné, aby povrchová teplota stien spaľovacej komory

bola dostatočne vysoká. Vo vyhriatej spaľovacej komore sa tvorí menší počet častíc ako v komore so studenými stenami. Predohrev vzduchu, či už sekundárneho alebo terciárneho, zvyšuje efektivitu spaľovania prchavej horľaviny uvoľnenej z paliva, čím sa znižuje množstvo vzniknutých častíc nameraných v spalinovode.

Tab. 2 Experimentálne zistené trendy produkcie jemných častíc v spalinách manuálneho spaľovacieho zariadenia

Sledovaný parameter	Počet jemných častíc [N.cm ⁻³ .min ⁻¹]			Hmotnosti jemných častíc [μg.m ⁻³ .min ⁻¹]		
	Pôvodná	Konečná	Zmena	Pôvodná	Konečná	Zmena
Prechod z I. do II.	9,0E+07	1,2E+07	-86 %	7,5E+05	3,0E+03	-99 %
Zvýšenie ťahu	3,9E+07	4,7E+07	+21 %	2,7E+05	3,3E+05	+20 %
Zníženie ťahu	3,9E+07	5,1E+07	+32 %	2,7E+05	4,0E+05	+44 %
Zvýšenie T komory	1,8E+07	1,0E+07	-40 %	6,7E+03	3,7E+03	-45 %
Zvýšenie T _{TV} v I.	5,2E+07	3,0E+07	-26 %*	6,4E+04	5,3E+04	-8 %*
Zvýšenie T _{TV} v II.	1,4E+07	9,5E+06	-19 %*	5,2E+03	3,0E+03	-25 %*
Zvýšenie T _{SV}	2,0E+07	1,6E+07	-23 %	6,7E+03	5,1E+03	-24 %
Povrch paliva	5,7E+06	1,1E+07	+93 %	3,6E+05	5,1E+05	+39 %

* - Meranie je porovnaním tvorby častíc počas jedného meraného cyklu, preto je v percentuálnom vyjadrení započítaný prirodzený pokles súvisiaci s vyháráním paliva ako je uvedené v kapitole 8.4.1 dizertačnej práce

I. – prvá fáza horenia; II. – druhá fáza horenia; T_{TV} – teplota terciárneho vzduchu; T_{SV} – teplota sekundárneho vzduchu.

Na základe týchto experimentálne zistených trendov je možné vhodnou kombináciou prevádzkových parametrov prispieť ku celkovému zníženiu tvorby jemných častíc v spalinách biomasových kotlov. Zvlášť v prípade krbu s manuálnym prikladáním paliva je efektivita spaľovacieho procesu, a s ňou súvisiaca tvorba jemných častíc, z veľkej časti závislá na obsluhu. Spôsob prikladania, použité palivo, nastavenie prívodu spaľovacieho vzduchu, ako aj ťahu komína, sú čiastkové parametre, ktorých správnu synchronizáciou a porozumením jednotlivých vplyvov na tvorbu emisií, je možné prispieť ku čistote ovzdušia.

ZÁVER

Malé domáce spaľovacie jednotky sú významným prispievateľom ku celkovému znečisteniu ovzdušia. Spaľovaním biomasy vznikajú jemné častice s veľkosťou do 1 μm , ktoré majú schopnosť deponovať v respiračnom trakte človeka. Cieľom tejto práce bolo popísať tvorbu jemných častíc skúmaním vplyvov jednotlivých prevádzkových parametrov spaľovacieho procesu v kotloch na biomasu. V rešeršnej časti práce bola preto spracovaná problematika tvorby častíc, ich rozdelenie, vplyv na zdravie človeka, ako aj súčasné limity dané legislatívou. Boli tiež zhrnuté aktuálne dostupné vedomosti týkajúce sa tejto problematiky. Vďaka pokročilým technológiám je dnes možné čoraz presnejšie merať koncentráciu a veľkostnú distribúciu jemných častíc. Vďaka chemickej analýze sme schopní určiť ich pôvod a vznik.

V experimentálnej časti práce sú uvedené výsledky spaľovacích skúšok. Merali sa jemné častice v rozsahu 18 – 550 nm. Produkcia častíc bola vyhodnotená na základe ich veľkosti, počtu, ako aj celkovej hmotnosti. V laboratórnych podmienkach bol pomocou termogravimetrickej analýzy skúmaný vplyv teploty, množstva kyslíka a geometrie spaľovanej vzorky na produkciu jemných častíc. Na automatických kotloch spaľujúcich biomasu bol skúmaný vplyv rôznych druhov paliva a teploty spaľovacej komory. Ukázala sa závislosť množstva vyprodukovaných jemných častíc na kvalite a výhrevnosti paliva. Studené steny spaľovacej komory majú za následok intenzívnejšiu tvorbu jemných častíc. Pri spaľovaní v dobre zahriatej spaľovacej komore bol pri peletách z rôzneho materiálu pozorovaný iba malý rozdiel v produkcii jemných častíc.

Väčšina spaľovacích skúšok, s cieľom sledovať vplyv prevádzkových parametrov na tvorbu častíc, prebehla na spaľovacom zariadení s ručným prikladaním kusového paliva. Zistil sa významný vplyv fázy horenia paliva a korelácia tvorby jemných častíc s množstvom uvoľňovanej prchavej horľaviny. Sledoval sa vplyv teploty spaľovacej komory, spôsobu privádzania vzduchu a geometrie paliva. Potvrdilo sa, že pri vyššej teplote spaľovania dochádza ku zníženiu tvorby jemných častíc. Boli určené percentuálne zmeny celkového počtu a hmotnosti jemných častíc vplyvom sledovaných parametrov.

Spaľovanie biomasy v malých domácich kotloch je stále populárne. Zároveň je trendom chrániť životné prostredie a dbať na čistotu ovzdušia. Emisné limity sa neustále sprísňujú. Aj keď sa zatiaľ legislatívne priamo neobmedzuje koncentrácia častíc PM_{10} , vzhľadom ku zdravotným rizikám s nimi spojenými, je potrebné hľadať spôsoby, ako chrániť ovzdušie. Pre výrobcov spaľovacích zariadení je to výzva neustále zdokonaľovať konštrukciu kotlov. Domáci užívatelia krbov s ručným prikladaním zasa môžu svojim prístupom a správnym nastavením parametrov spaľovať čistejšie. Veríme, že aj táto práca pomohla objasniť vplyvy jednotlivých prevádzkových parametrov týkajúcich sa spaľovania biomasy na tvorbu jemných častíc a poskytla podnety pre ďalší výskum v uvedenej problematike.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] BOUCHER, Olivier a Ulrike LOHMANN. The sulfate-CCN-cloud albedo effect. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* [online]. 2017, **47**(3), 281-300 [cit. 2018-08-14]. DOI: 10.3402/tellusb.v47i3.16048. ISSN 1600-0889. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.3402/tellusb.v47i3.16048>
- [2] Aerosol Influence on Clouds (Cloud Albedo Effect): Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis. In: *Www.ipcc.ch: IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007* [online]. Switzerland: C/O World Meteorological Organization, 2007 [cit. 2018-08-14]. Dostupné z: https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-4-5.html
- [3] SIPPULA, OLLI. Fine particle formation and emissions in biomass combustion. *Report series in aerosol science*. 2010, **108**. ISBN 9525822141.
- [4] OBERNBERGER, Ingwald, Thomas BRUNNER a Georg BÄRNTHALER. Fine particulate emissions from modern Austrian small-scale biomass combustion plants. In: *Proceedings of the 15th European Biomass Conference & Exhibition*. 2007.
- [5] LONG, Christopher, Marc NASCARELLA a Peter VALBERG. Carbon black vs. black carbon and other airborne materials containing elemental carbon: Physical and chemical distinctions. *Environmental Pollution* [online]. 2013, **181**, 271-286 [cit. 2020-07-20]. DOI: 10.1016/j.envpol.2013.06.009. ISSN 02697491. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0269749113003266>
- [6] POPE, C. a Douglas DOCKERY. Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. *Journal of the Air & Waste Management Association* [online]. 2012, **56**(6), 709-742 [cit. 2020-07-20]. DOI: 10.1080/10473289.2006.10464485. ISSN 1096-2247. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10473289.2006.10464485>
- [7] BLAŽEK, JAROSLAV, IVANA SÝKOROVÁ a MARTINA HAVELCOVÁ. BLACK CARBON JAKO PRODUKT NE DOKONALÉHO SPALOVÁNÍ – VZNIK, VLASTNOSTI, VÝSKYT, STANOVENÍ. *Chemicke-listy.cz* [online]. Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, v.v.i., V Holešovičkách 41, 182 09 Praha 8: Chem. Listy 108, 2014 [cit. 2018-08-10]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2014_09_859-864.pdf
- [8] KIRKEVÅG, A., T. IVERSEN, Ø. SELAND et al. Aerosol–climate interactions in the Norwegian Earth System Model – NorESM1-M. *Geoscientific Model Development* [online]. 2013, **6**(1), 207-244 [cit. 2020-07-

- 20]. DOI: 10.5194/gmd-6-207-2013. ISSN 1991-9603. Dostupné z: <https://gmd.copernicus.org/articles/6/207/2013/>
- [9] SENGUPTA, Deep, Vera SAMBUROVA, Chiranjivi BHATTARAI et al. Light absorption by polar and non-polar aerosol compounds from laboratory biomass combustion. *Atmospheric Chemistry and Physics* [online]. 2018, **18**(15), 10849-10867 [cit. 2020-07-20]. DOI: 10.5194/acp-18-10849-2018. ISSN 1680-7324. Dostupné z: <https://www.atmos-chem-phys.net/18/10849/2018/>
- [10] PENG, Xiaole, Qingju HAO, Tianxue WEN et al. Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in Atmospheric Aerosols in the Urban Area in Beibei, a Suburb of Chongqing. *Aerosol and Air Quality Research* [online]. 2018, **18**(11), 2764-2774 [cit. 2020-07-20]. DOI: 10.4209/aaqr.2017.11.0450. ISSN 16808584. Dostupné z: <https://aaqr.org/articles/aaqr-17-11-maps-0450>
- [11] Zákon č. 201/2012 Sb. ze dne 2. května 2012 o ochraně ovzduší: Sbíрка zákonů České republiky. In: *Sbíрка zákonu* [online]. Česká republika: MŽP, 2012 [cit. 2018-08-17]. Dostupné z: <http://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/ViewFile.aspx?type=z&id=24325>
- [12] *Air Quality Standards* [online]. Europe: Environment Directorate General of the European Commission, 2020 [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>
- [13] MOMENI, M., C. YIN, S. KÆR, T. HANSEN, P. JENSEN a P. GLARBORG. Experimental Study on Effects of Particle Shape and Operating Conditions on Combustion Characteristics of Single Biomass Particles. *Energy & Fuels* [online]. 2012, **27**(1), 507-514 [cit. 2018-07-10]. DOI: 10.1021/ef301343q. ISSN 0887-0624. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/ef301343q>
- [14] MOCK, Chinsung, Hookyung LEE, Sangmin CHOI a Vasilije MANOVIC. Combustion Behavior of Relatively Large Pulverized Biomass Particles at Rapid Heating Rates. *Energy & Fuels* [online]. 2016, **30**(12), 10809-10822 [cit. 2018-07-24]. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.6b01457. ISSN 0887-0624. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.6b01457>
- [15] XU, Yue, Yan WANG, Yingjun CHEN, Chongguo TIAN, Yanli FENG, Jun LI a Gan ZHANG. Characterization of fine and carbonaceous particles emissions from pelletized biomass-coal blends combustion: Implications on residential crop residue utilization in China. *Atmospheric Environment* [online]. 2016, **141**, 312-319 [cit. 2018-08-16]. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.06.073. ISSN 13522310. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231016305143>
- [16] RIAZA, Juan, Reza KHATAMI, Yiannis LEVENDIS, Lucía ÁLVAREZ, María GIL, Covadonga PEVIDA, Fernando RUBIERA a José PIS. Combustion of single biomass particles in air and in oxy-fuel conditions.

- Biomass and Bioenergy* [online]. 2014, **64**, 162-174 [cit. 2018-07-25]. DOI: 10.1016/j.biombioe.2014.03.018. ISSN 09619534. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953414001366>
- [17] LAMBERG, Heikki, Kati NUUTINEN, Jarkko TISSARI et al. Physicochemical characterization of fine particles from small-scale wood combustion. *Atmospheric Environment* [online]. 2011, **45**(40), 7635-7643 [cit. 2017-07-10]. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.02.072. ISSN 13522310. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S135223101100255X>
- [18] TISSARI, Jarkko, Kati HYTÖNEN, Olli SIPPULA a Jorma JOKINIEMI. The effects of operating conditions on emissions from masonry heaters and sauna stoves. *Biomass and Bioenergy* [online]. 2009, **33**(3), 513-520 [cit. 2018-08-16]. DOI: 10.1016/j.biombioe.2008.08.009. ISSN 09619534. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953408002067>
- [19] HATA, Mitsuhiro, Jiraporn CHOMANEE, Thunyapat THONGYEN, Linfa BAO, Surajit TEKASAKUL, Perapong TEKASAKUL, Yoshio OTANI a Masami FURUUCHI. Characteristics of nanoparticles emitted from burning of biomass fuels. *Journal of Environmental Sciences* [online]. 2014, **26**(9), 1913-1920 [cit. 2018-07-10]. DOI: 10.1016/j.jes.2014.07.005. ISSN 10010742. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1001074214000904>
- [20] HINDS, William. *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*. 2nd ed. New York: Wiley, 1999. ISBN 9780471194101.
- [21] Technické normy. In: *Tzb-info.cz* [online]. Praha: TZB-info, 2020 [cit. 2020-07-13]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/normy>
- [22] PAŽOUREK, Josef. *Jemné částice emitované při reálném spalování biomasy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018, 53 s.. BP. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
- [23] WEIMER, S., M. ALFARRA, D. SCHREIBER, M. MOHR, A. PRÉVÔT a U. BALTENSPERGER. Organic aerosol mass spectral signatures from wood-burning emissions: Influence of burning conditions and wood type. *Journal of Geophysical Research* [online]. 2008, **113**(10) [cit. 2018-10-30]. DOI: 10.1029/2007JD009309. ISSN 0148-0227. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1029/2007JD009309>

ŽIVOTOPIS AUTORA

Osobné informácie

Meno: Ing. Ján Poláčik
Dátum narodenia: 26.11. 1990
Národnosť: slovenská
E-mail: jan.polacik@vutbr.cz

Zamestnanie a prax

2014 **Úrad pre reguláciu siet'ových odvetví:** Pracovná stáž, Odbor regulácie tepelnej energetiky, Bratislava
2016 - **Strojirenský technik ve výzkumu a vývoji** – FSI VUT v Brně, Odbor energetického inžénýrství

Vzdelanie

2015 - **Vysoké učení technické v Brně**, Fakulta strojního inžénýrství, obor Konstrukční a procesní inžénýrství, doktorské štúdium
2013 - 2015 **Vysoké učení technické v Brně**, Fakulta strojního inžénýrství, obor Energetické inžénýrství, magisterské štúdium, zakončené štátnou skúškou, získaný titul inžinier
2010 - 2013 **Vysoké učení technické v Brně**, Fakulta strojního inžénýrství, obor Energetika, procesy a ekologie, zakončené štátnou skúškou, získaný titul bakalár

Doplňkové vzdelanie:

2014-2015 John Maxwell's Leadership Training Course
2018-2020 **Učitelství odborných předmětů pro střední školy** – pedagogické minimum na Institutu celoživotního vzdělávání VUT v Brně

Vedomosti:

Jazyky: Angličtina: pokročilý (úroveň B2/C1)
Nemčina: začiatocník
IT: LabVIEW, CHEMCAD, MS Windows, MS Office, macOS, iPadOS
iOS, Procreate, LumaFusion,

ABSTRAKT

Práca sa venuje problematike vplyvu prevádzkových parametrov spaľovania biomasy na tvorbu jemných častíc. Rešeršná časť práce popisuje vlastnosti jemných častíc, ich základné rozdelenie, vplyv na zdravie človeka a životné prostredie. Zhrnuté sú základné vedomosti vplyvu spaľovacích procesov biomasy na emisie jemných častíc s veľkosťou do 1 μm . V hlavnej časti je popísané experimentálne vybavenie pre vyhodnocovanie veľkostnej distribúcie jemných častíc. Nasleduje popis použitých experimentálnych zariadení pre spaľovanie s nameranými výsledkami pre rôzne parametre spaľovania v laboratórnych podmienkach, automatických kotloch, ako aj v krbe s ručným prikladaním paliva. Hlavnými sledovanými parametrami boli teplota spaľovania, množstvo kyslíka, druh paliva a geometria spaľovanej biomasy. Vyhodnotený je vplyv zmeny jednotlivých parametrov na tvorbu jemných častíc. Záver práce zhrňa, ako je vhodnou voľbou prevádzkových parametrov spaľovania možné významne ovplyvniť emisie jemných častíc.

ABSTRACT

This work deals with the impact of operating parameters on fine combustion particles formation in the flue gas of biomass combustion device. The research part of the work describes the properties of fine particles, its basic division, impact on human health and the environment. The basic knowledge of the influence of biomass combustion process on fine particles production up to 1 μm in size is summarized. The main part describes the experimental setup for evaluating the size distribution of fine particles. The following section describes the experimental setup with measured results for various combustion parameters in laboratory combustion, automatic boilers, as well as in the manual wood-burning combustion device. The main parameters which were tested were combustion temperature, oxygen amount, type of fuel and geometry of the burned biomass. The impact of individual parameters on the formation of the fine particles is evaluated. The final part of the thesis summarizes the ways in which it is possible to significantly influence the emissions of fine particles by the appropriate choice of combustion operating parameters.