



INTERREG V-A
SLOVENSKÁ REPUBLIKA
ČESKÁ REPUBLIKA



EURÓPSKA ÚNIA
EURÓPSKY FOND
REGIONÁLNEHO ROZVOJA
SPOLOČNE BEZ HRANÍC

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

CEET, Výzkumné energetické centrum

Paliva a jejich vlastnosti



Vytvořeno v rámci projektu „Inovace pro zdroje energetiky“ č. 304011Y352, který je realizován v rámci Operačního programu INTERREG V-A Slovenská republika – Česká republika, který je spolufinancován z Evropského fondu pro regionální rozvoj.



INTERREG V-A
SLOVENSKÁ REPUBLIKA
ČESKÁ REPUBLIKA



EURÓPSKA ÚNIA
EURÓPSKY FOND
REGIONÁLNEHO ROZVOJA
SPOLOČNE BEZ HRANÍC

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

CEET, Výzkumné energetické centrum

Paliva a jejich vlastnosti

Vytvořeno v rámci projektu „Inovace pro zdroje energie“ č. 304011Y352, který je realizován v rámci Operačního programu INTERREG V-A Slovenská republika – Česká republika, který je spolufinancován z Evropského fondu pro regionální rozvoj.

Ostrava, 2022

Autoři:

Ing. Jan Koloničný, Ph.D.

Ing. Petr Kubesa

Ing. Radomíra Pánková

Ing. Oleksandr Molchanov, Ph.D.

Ing. Silvie Petránková Ševčíková, Ph.D.

doc. Ing. Michal Holubčík, PhD.

Ostrava 2022

ISBN 978-80-248-4624-8

Obsah

1. Úvod	4
2. Základní vlastnosti paliva	5
3. Spalování, spotřeba vzduchu a množství spalin	12
3.1 Konstrukce spalovacího zařízení a rozvody spalovacího vzduchu.....	14
3.2 Výše teploty.....	15
3.3 Dostatek času a prostoru pro vzájemnou reakci.....	16
3.4 Nedokonalé spalování	17
4. Účinnost spalovacího zařízení, jak jí doma změřit	18
5. Produkce škodlivin z lokálních topenišť	22
5.1 Vliv konstrukce zařízení a typu paliva na měrné emise.....	25
5.1.1 Vliv konstrukce zařízení a typu paliva na měrné emise sumy polyaromatických uhlovodíků (PAU).....	25
5.1.2 Vliv konstrukce zařízení a typu paliva na měrné emise PCDD/F	26
5.1.3 Vliv spalování hnědého uhlí a bukového dřeva na celkové emise	27
5.1.4 Porovnávání emisí při spalování různých druhů dřeva	31
5.2 Vliv typu kotle, tepelného výkonu a spalovaného paliva na emisní faktory znečišťujících látek	34
6. Spalování alternativních paliv.....	44
6.1 Měrná emise CO ₂ při spalování různých paliv	45
6.2 Barva dřevěných briket a jejich kvalitativní vlastnosti	46
6.3 Spalování netradičních paliv.....	47
6.4 Spalování bukového listí v domácnostech	53
7. Spalování polyetylenových sáčků a dřeva v domácnostech.....	59
8. Vliv druhu biomasy a teploty zpopelnění na vlastnosti popelů pevných paliv	66
9. Závěr	78
10. Seznam značek a zkratk.....	79
11. Seznam grafů.....	80
12. Seznam obrázků	81
13. Seznam tabulek	82
14. Zdroje informací	83

1. Úvod

České domácnosti využívají pro vytápění, přípravu teplé vody, či vaření minimálně 700 tisíc kotlů a 500 tisíc kamen, krbů a sporáků na pevná paliva. I když neustále sílí tlaky na náhradu pevných paliv v domácnostech jinými zdroji tepla, je zřejmé, že v dohledné budoucnosti budou mít v tomto energetickém sektoru pevná paliva stále své nezanedbatelné (pevné) místo. Díky legislativnímu tlaku, ale i stále se zvyšujícímu obecnému podvědomí o nutnosti ochrany životního prostředí, lze v sektoru lokálního vytápění domácností již nějakou dobu pozorovat ústup od spalování uhlí. Oproti tomu statistické údaje potvrzují neustálý růst zájmu o spalování biomasy. Svě trvalé místo má mezi palivy pro lokální vytápění domácností bezesporu kusové dřevo. Stále výrazněji však roste zájem také o ušlechtilá dřevní paliva, vedle dřevních briket se jedná o dřevní peletu.

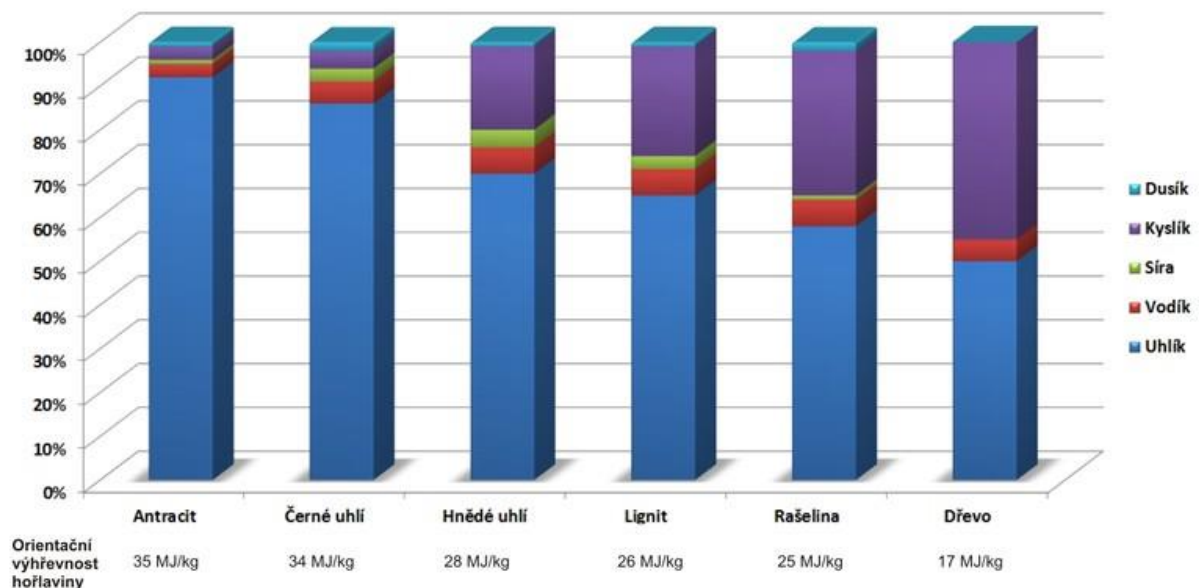
Bohužel i nadále se setkáváme s kotly se zastaralou konstrukcí, kde ani ušlechtilé palivo nezaručí, že při spalování nebude docházet k tvorbě znečišťujících látek v množství, překračujícím povolené koncentrace. Proto je nezbytné na tvorbu emisí pohlížet jednak z pohledu konstrukce spalovacího zařízení, ale také z pohledu volby vhodného paliva.

2. Základní vlastnosti paliva

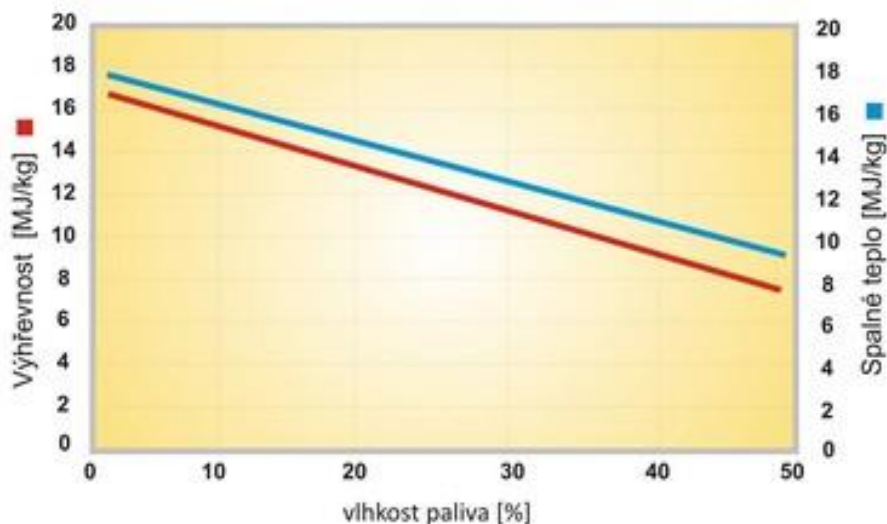
Obecně můžeme říci, že palivo je látka, která hoří a že při tomto procesu se uvolňuje teplo, které využíváme pro naše potřeby (topení, vaření, koupání). Palivo se skládá z hořlaviny (h) a balastu. Hořlavina je ta část, kterou v palivu chceme, protože je nositelem energie. Balastem nazýváme tu část paliva, která je v palivu obsažena, ale nepřináší žádný energetický zisk, hovoříme o vodě (W) a popelovině (A). Se snižujícím se obsahem vody a popeloviny se zvyšuje kvalita paliva, snáze a účinněji se spaluje, obsahuje více energie. Se snižujícím se obsahem popeloviny se zmenšují emise tuhých znečišťujících látek (prach) a zmenšuje se náročnost údržby spalovacího zařízení (odpopelnění – tuhý zbytek po spálení nazýváme popelem).

Organická složka paliva (hořlavina) se skládá z pěti základních prvků: C – uhlík, H – vodík, O – kyslík, N – dusík a S – síra. První tři zásadním způsobem ovlivňují vlastní spalovací proces a poslední dva spíše ovlivňují produkci znečišťujících látek (tvorba oxidů dusíku – NO_x a oxidu siřičitého – SO₂). Uhlík, vodík a síra představují aktivní prvky hořlaviny a jsou nositeli chemicky vázané energie, která se při jejich spalování uvolňuje. Kyslík a dusík představují pasivní složku hořlaviny, protože nepřináší žádnou energetickou hodnotu. Složení hořlaviny jednotlivých paliv je proměnlivé.

Graf 1 uvádí průměrné hodnoty složení hořlaviny. „Mladá“ paliva (biomasa) jsou málo prouhelněna, takže obsahují nejméně uhlíku (cca 45 %), ale více vodíku (cca 5 %) a kyslíku (cca 40 %). Stejně tak obsahují více prchavé hořlaviny (hořlavina, která se po dostatečném zahřátí uvolňuje v podobě hořlavých plynů), takže se snáze zapalují a hoří větším plamenem.



Graf 1 Srovnání prvkového složení hořlaviny různých paliv včetně jejich výhřevností



Graf 2 Závislost výhřevnosti a spalného tepla dřeva na jeho vlhkosti

Základním a zřejmě i nejdůležitějším parametrem, který charakterizuje palivo, je výhřevnost, resp. spalné teplo. Zjednodušeně řečeno tyto veličiny vyjadřují množství chemicky vázaného tepla (např. v MJ nebo kWh), které se uvolní při dokonalém spálení jednotkové hmotnosti paliva (např. v $\text{kg}_{\text{paliva}}$ nebo v t_{paliva}). Čím větší výhřevnost, tím méně musíme přikládat, abychom vytopili stejný prostor. Hodnota výhřevnosti nejvíce závisí na obsahu aktivních prvků hořlaviny (C, H, S). Čím větší část paliva bude tvořena těmito prvky, tím více energie bude obsahovat, a tím větší výhřevnost palivo bude mít. Se zvyšujícím se obsahem vody a popeloviny se snižuje obsah aktivních prvků, a tedy výhřevnost klesá.

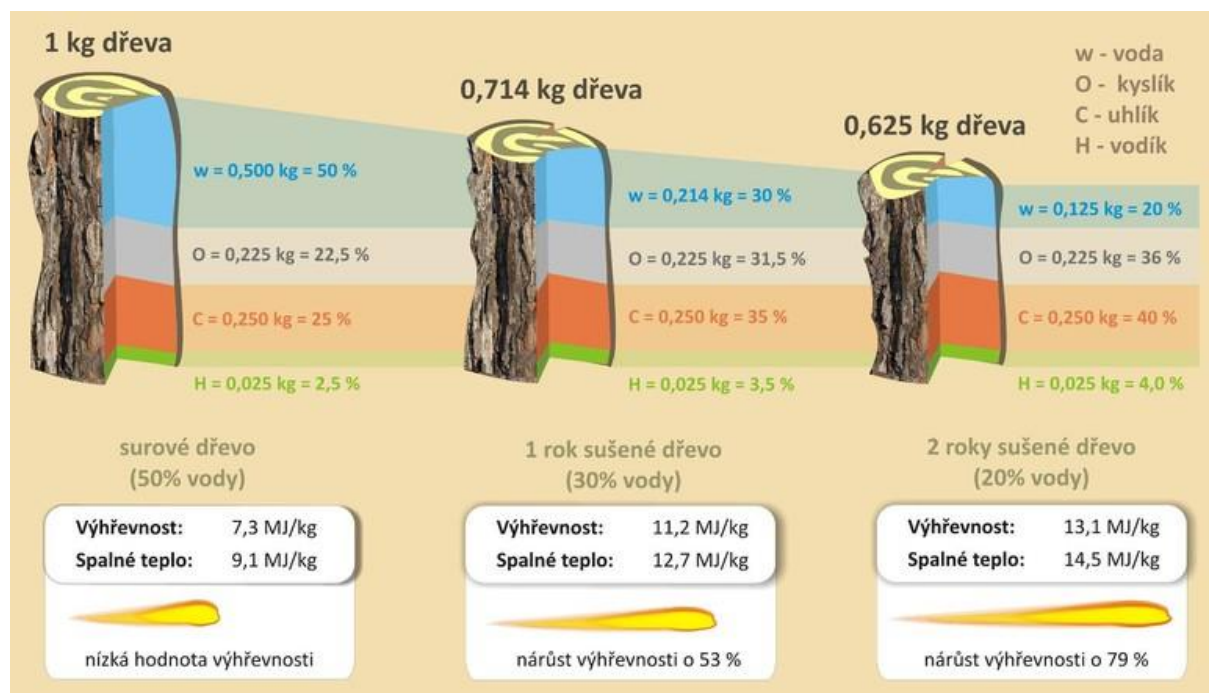
Obsah popeloviny můžeme ovlivnit jen minimálně, ale obsah vody např. u biomasy (dřeva apod.) jsme schopni výrazně snížit sušením. Kdyby dřevo bylo naprosto suché, tak by jeho výhřevnost (hovoříme o výhřevnosti hořlaviny, popelovina je zanedbatelná, její obsah je většinou menší než 1 %) byla kolem $17 \text{ MJ/kg}_{\text{hořlaviny}}$. Bohužel surové dřevo (čerstvě pokácené) obsahuje značné množství vody (je mokré, „živé“). Obsah vody je ovlivněn druhem stromu a také ročním obdobím, ve kterém byl strom pokácen. Obsah vody v surovém dřevu se pohybuje přibližně od 40 do 60 hmotnostních procent. Výraznou závislost výhřevnosti dřeva na jeho vlhkosti znázorňuje Graf 2. Zjednodušeně můžeme říci, že polovina surového dřeva je tvořena vodou a druhá polovina je tvořena hořlavinou, takže výhřevnost surového dřeva bude přibližně poloviční ($8,5 \text{ MJ/kg}_{\text{dřeva}}$ – ve skutečnosti to bude ještě méně o výparné teplo vody $1,2 \text{ MJ}/0,5 \text{ kg}_{\text{vody}}$, ale to bude vysvětleno později) ve srovnání s výhřevností samotné hořlaviny ($17 \text{ MJ/kg}_{\text{hořlaviny}}$). Výhřevnost dřeva po jednom roce sušení se zvýší cca na $11,2 \text{ MJ/kg}_{\text{dřeva}}$ a po dvou letech sušení, kdy dřevo můžeme již považovat za vysušené a vhodné pro spalování (obsah vody pod 20 %), se zvedne jeho výhřevnost přibližně na $13,1 \text{ MJ/kg}_{\text{dřeva}}$.

Co se děje, když se suší surové dřevo, názorně popisuje Obrázek 1. Na levé straně obrázku je znázorněn kus surového (mokrého) dřeva (polínko) o hmotnosti jeden kilogram, který obsahuje cca 0,5 kg, tedy 50 % vody. Po jednom roce sušení (venku pod přístřeškem) se obsah vody zmenší cca na 30 % (v prvním roce se odpaří cca $0,286 \text{ kg}_{\text{vody}}$) a po dvou letech bude menší než 20 % (v druhém roce se odpaří cca $0,089 \text{ kg}_{\text{vody}}$). To znamená, že celková hmotnost původního polínka se zmenší z jednoho kilogramu cca na $0,625 \text{ kg}$ (za dva roky se odpařilo cca $0,375 \text{ kg}_{\text{vody}}$). Množství aktivní hořlaviny zůstalo v daném kusu paliva nezměněno (cca $0,25 \text{ kg}$

uhlíku – C a cca 0,025 kg vodíku – H), ale protože se snížila celková hmotnost polínka, je koncentrace aktivní hořlaviny vyšší, nyní tvoří cca 44 % z původních 27,5 %. Proto se zvýšilo i množství měrné energie – výhřevnost paliva, která se vyjadřuje jako množství energie v MJ na kg paliva (výhřevnost vzrostla z původních 7,3 MJ/kg na 13,1 MJ/kg, což je navýšení cca o 80 %). Není to dáno tím, že by se zvýšilo množství hořlaviny, ale tím, že se zmenší hmotnost polínka cca o 0,375 kg vody, která se během dvou let odpaří. Aby se vypařil (voda přejde do plynného stavu a opustí strukturu dřeva – dřevo se vysuší) jeden kilogram vody, je nutné spotřebovat (dodat) tzv. výparné (skupenské) teplo vody, které má hodnotu cca 2,45 MJ/kg_{vody}. Pro výše uvedených 0,375 kg vody se tedy jedná cca o 0,92 MJ. O toto teplo se nám také zvýšila výhřevnost kousku dřeva, protože voda nehoří a při spalování dřeva dochází v ohništi k jeho sušení, následně pak hoří aktivní prvky hořlaviny.

Chytrý člověk suší dřevo alespoň dva roky, protože ví, že suché dřevo má vyšší výhřevnost, dá se efektivněji spálit (lépe hoří a produkuje méně emisí znečišťujících látek), takže se mu sníží spotřeba paliva a v neposlední řadě prodlouží životnost spalovacího zařízení (menší obsah vody ve spalinách snižuje riziko kondenzace a dehtování).

Nejlépe se dřevo suší v dobře větraném dřevníku nebo stačí přístřešek na zahradě. Ve sklepě může surové dřevo plesnivět a hnit, což snižuje jejich energetickou hodnotu (záleží na vlhkosti a provětrání sklepa). Potřeba sušení dřeva klade zvýšené nároky na venkovní prostory k jeho uskladnění a sušení. Průměrný dům vytápěný kusovým dřevem spálí ročně kolem deseti metrů krychlových dřeva. V ideálním případě je žádoucí mít ve venkovních prostorech skladovány minimálně dvě roční spotřeby dřeva (ty jsou ve fázi sušení) plus již vysušené palivo ve skladovacích prostorách u kotelny nebo ve venkovních prostorách. Je nutné mít přehled o tom, které palivo je již dva roky sušeno a které se bude v nadcházející topné sezóně spalovat (nejlépe označit). To představuje nemalé prostorové nároky.



Obrázek 1 Schématické zobrazení vlivu sušení dřeva na výhřevnost

Lidé se často domnívají, že tvrdé dřevo (např. dub, ořešák, javor, třešeň, jabloň, jasan, buk, hrušeň, švestka, akát, habr) má větší výhřevnost než dřevo měkké (např. smrk, borovice, jedle, topol, vrba, lípa, modřín, bříza). Je to mylný názor, ale na druhou stranu je nutné říci, že spálením kousku tvrdého dřeva se uvolní více tepla, než když spálíme objemově stejný kousek měkkého dřeva. Čím to tedy je? Je to tím, že tvrdé dřevo je těžší, má větší hustotu ($\text{kg}_{\text{dřeva}}/\text{m}^3_{\text{dřeva}}$) a výhřevnost vyjadřuje množství tepla obsaženého v kilogramu paliva. Při stejném obsahu vlhkosti bude jeden koš měkkého dřeva lehčí než stejný koš tvrdého dřeva, takže při jeho spálení se víc ohřejeme. Kvalitní pelety či brikety mají hustotu o něco větší než voda.

Množství energie v palivu vyjadřujeme buď jako výhřevnost nebo jako spalné teplo. Výhřevnost se nedá změřit a počítá se ze spalného tepla, které se stanoví v kalorimetru a z obsahu vodíku (prvkový rozbor paliva). Nejlépe lze pochopit rozdíl mezi výhřevností a spalným teplem, když si popíšeme, jak se prakticky tyto hodnoty získávají. Spalné teplo se měří v kalorimetru, který si můžeme představit jako nádobu (patrona – podobná nerezové termosce), do které vložíme miskou s přibližně jedním gramem (jedna polovina kávové lžičky) najemno pomletého paliva. Nádobu naplníme kyslíkem (aby palivo dobře hořelo), uzavřeme a pak jej zapálíme. Palivo hoří, což je reakce při, které se uvolňuje teplo (exotermní). Celá nádoba je ponořena ve vodě (cca teplota laboratoře = 20 °C), která se díky uvolněnému teplu zahřívá, celá nádoba s vodou je tepelně izolovaná od okolí. Můžeme říci, že srdce kalorimetru představuje přesné měření absolutní hodnoty teplotního rozdílu (diference) teploty vody před zapálením paliva až po jeho úplné shoření (teplota po zapálení prudce roste a postupně se ustálí na hodnotě cca do 25 °C). Známé množství zahřáté vody, hodnota tepelné kapacity vody a teplotní diference je přímo úměrná teplu např. v kJ, které se uvolnilo při spalování známého množství paliva např. v g. Tento poměr představuje spalné teplo paliva, které se vyjadřuje např. v kJ/g, MJ/kg, GJ/t, kWh/kg apod. **Spalné teplo** je definováno jako teplo, které se uvolnilo při spálení jednotkového množství paliva s tím, že produkty spalování (spaliny) jsou ochlazené na původní teplotu paliva, takže veškerá voda obsažená ve spalinách zkondenzuje a na konci experimentu je v kapalném stavu. U **výchřevnosti** je tomu tak, že voda ve spalinách nezkondenzuje (přestože by byly ochlazené na původní teplotu), ale zůstane v plynném stavu, takže se neuvolní skupenské teplo vody. Jedná se pouze o teoretický stav, který nelze v praxi experimentálně změřit, proto se výhřevnost vypočítává ze spalného tepla. Do spalin se voda může dostat třemi cestami:

- Palivo, které hoří, je vlhké a obsahuje vodu, která při spalování nehoří, ale vypařuje se, takže dochází k sušení paliva, odpařená voda následně tvoří část spalin (z jednoho kilogramu – litru vody se jeho vypařením vytvoří cca 1,2 m³ vodní páry (zvětší objem více než tisíckrát).
- Jedním z aktivních prvků hořlaviny je vodík, který je ve struktuře tuhých paliv vázán v různých podobách. U plynných a kapalných paliv se jedná o směs mnoha uhlovodíků (např. zemní plyn obsahuje převážně metan). Když vodík v jakékoliv podobě hoří, tvoří se vodní pára, která je součástí spalin (v mrazivých dnech můžeme pozorovat bílý kouř nad komíny, to je vodní pára). Z jednoho kilogramu vodíku se vytvoří cca devět kg vodní

páry, což je přibližně 11,2 m³ vodní páry. Spálením jednoho metru krychlového zemního plynu se vytvoří cca 1,5 kg (1,9 m³) vodní páry.

- Také samotný spalovací vzduch obsahuje vzdušnou vlhkost.

Spaliny tedy obsahují vodní páru z vlhkosti paliva, ze spalování vodíku a ze spalovacího vzduchu. Pokud spaliny ochladíme pod teplotu rosného bodu, vodní pára zkondenzuje (stejně tak se v zimě orosí brýle, když vejdemo do teplé místnosti, protože brýle mají nižší teplotu než teplota rosného bodu vody obsažené ve vzduchu), mění skupenství z plynného na kapalné a tím se uvolní skupenské teplo vody (2,45 MJ/kg_{vody}), které je stejně velké jako teplo, které se spotřebuje na to, abychom vodu vypařili. Zde je ten zásadní rozdíl mezi spalným teplem a výhřevností. U spalného tepla vodní pára zkondenzovala, ale u výhřevnosti uvažujeme s tím, že voda obsažená ve spalinách zůstane v plynném stavu, tedy jako vodní pára, takže se neuvolní skupenské teplo vody z kondenzace. Z výše uvedeného vyplývá, že pokud palivo obsahuje vodu nebo vodík, bude spalné teplo větší než výhřevnost (viz Graf 3). Výhřevnost se ze spalného tepla vypočítá tak, že se spalné teplo sníží o skupenské teplo vody dle tohoto vztahu:



Palivo	Vlhkost paliva	Výhřevnost	Spalné teplo	O kolik je spalné teplo větší než výhřevnost
	[%]			[%]
Koks	4,75	27,84	28,02	0,6
Dřevo (buk)	10	16,06	16,96	5,6
	20	14,00	15,08	7,7
	30	11,94	13,19	10,5
	40	9,89	11,31	14,4
HU	10	25,61	26,97	5,3
	20	22,49	23,97	6,6
	30	19,37	20,97	8,3
	40	16,26	17,98	10,6
ČU	10	27,56	28,79	4,5
	20	24,23	25,59	5,6
	30	20,89	22,39	7,2
	40	17,56	19,19	9,3
ZP	-	34,41	38,23	11,1
PB	-	46,60	50,70	8,8

Graf 3 Porovnání hodnot výhřevností a spalných tepel různých paliv

Dva kilogramy suchého nebo čtyři kilogramy mokrého dřeva mají přibližně stejnou výhřevnost jako jeden metr krychlový zemního plynu. V současné době se pohybuje cena jednoho metru krychlového zemního plynu pro domácnosti, které jej používají pro vytápění kolem 22 Kč včetně DPH.

Selský rozum by velel k tomu, abychom při spalování využívali spalné teplo a ne „jenom“ výhřevnost. Žel, není to tak snadné, protože pokud bychom chtěli využít spalné teplo, museli bychom donutit zkondenzovat (dostatečně ji zchladit) vodní páru obsaženou ve spalinách, což způsobuje tyto základní komplikace:

- zvýšené požadavky na korozní odolnost teplosměnných ploch výměníku, kondenzát může být agresivní;
- zvýšené požadavky na odvod spalin, kapičky kondenzátu, dehtování – odolný kouřovod a komín, odvod kondenzátu;
- nízká teplota spalin minimalizuje komínový tah, takže je nutné, aby zařízení mělo kouřový nebo vzduchový ventilátor;
- zanášení teplosměnných ploch, kondenzace dehtů, ulpívání prachu a sazí – nutnost čištění;
- nízkopotenciální teplo – aby byly spaliny zchlazené pod rosný bod, je potřebná dostatečně nízká teplota zpátečky – ideální využití pro podlahové vytápění např. při teplotním spádu 50/30 °C;
- kondenzát a jeho likvidace (v současnosti je u plynových kotlů do 50 kW povoleno kondenzát vypouštět do kanalizace).

Kondenzace vodní páry obsažené ve spalinách má tato pozitiva:

- snížení teploty spalin = zmenšení komínové ztráty = zvýšení účinnosti;
- při kondenzaci vodní páry se uvolňuje její skupenské teplo, které je předáno topné vodě (v teplovodním výměníku kotle), a tím se navýší množství vyrobeného tepla, využíváme nejen výhřevnost, ale část skupenského tepla, resp. rozdílu mezi spalným teplem a výhřevností.

Efektu kondenzace se využívá v kondenzačních kotlích, přičemž u zařízení spalujících plynná paliva se jedná o velmi rozšířený jev. Plynné palivo je „čisté“ a „suché“, takže komplikace s kondenzátem jsou minimální. Teoreticky se spálením jednoho metru krychlového vytvoří cca 1,5 kg (litru) vody. V reálném provozu je to o něco méně a z plynového kondenzačního kotle do kanalizace vyteče cca jeden kilogram (litr) kondenzátu, což představuje cca 66% využití zisku z kondenzace vody ze spalin. Využití kondenzace při spalování tuhých paliv je v začátcích a zatím existují jen aplikace pro spalování dřevních peletek, kde však přínos kondenzací není tak významný. Vývoj směřuje k využití kondenzace při spalování vlhké (více než 40%) biomasy v podobě dřevní štěpky.

Účinnost kotle se počítá jako poměr tepla vyrobeného (výkon) k teple dodanému (příkon). V Evropě se při výpočtu účinnosti teplo dodané vyjadřuje z **výhřevnosti** paliva, proto se

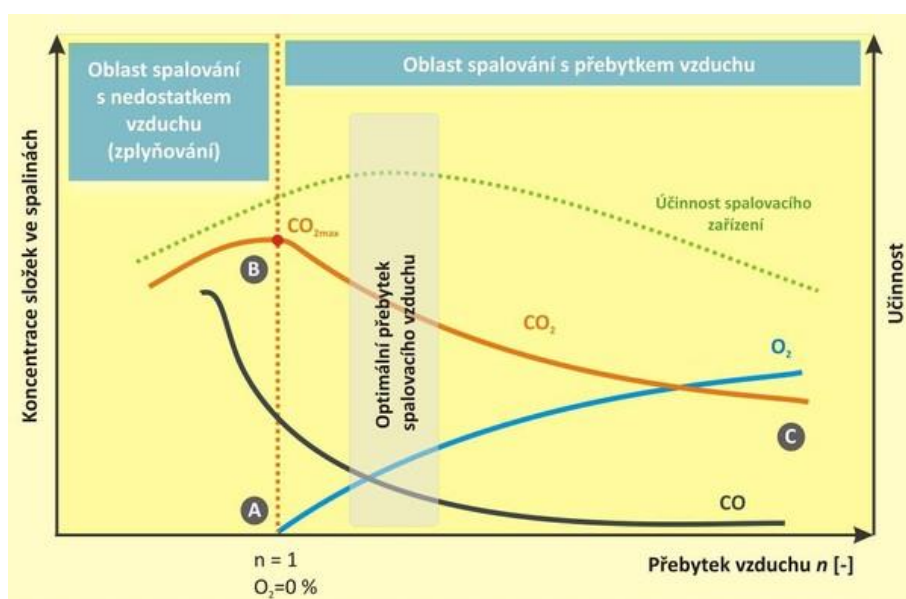
v případě kondenzačních kotlů můžeme setkat s výslednou účinností, která je vyšší než 100 %. Samozřejmě, že se nejedná o perpetuum mobile, ale jde o to, zda se teplo dodané do kotle vyjadřuje z výhřevnosti či spalného tepla. Správně by se mělo vyjadřovat ze spalného tepla, jenže potom by takto vyjádřená účinnost nebyla porovnatelná s účinností „klasických“ nekondenzačních kotlů. Nutnost porovnání je žádoucí, a proto se nabízí tato řešení:

- u všech kotlů počítat příkon ze spalného tepla, toto řešení by bylo z pohledu správnosti nejlepší, ale to by znamenalo, že u dosud prodávaných nekondenzačních kotlů by se účinnost musela přepočítat a znamenalo by to také to, že by se její hodnota snížila (např. z 90 na 83 %). Z pohledu výrobců, ale i z pohledu zákazníků je tento krok těžko akceptovatelný;
- ponechat původní výpočet účinnosti, kdy je příkon počítán z výhřevnosti a vysvětlit, že přestože účinnost kondenzačních kotlů vychází větší než 100 %, nejedná se o perpetuum mobile, ale o údaj, který umožní porovnání účinnosti kondenzačního a nekondenzačního kotle;
- třetí způsob by mohl být kombinací dvou výše uvedených bodů a mohl by uvádět obě hodnoty.

3. Spalování, spotřeba vzduchu a množství spalin

Podstatou spalovacího procesu je hoření paliva, jedná se o jev, při kterém hoří palivo za vývinu tepla a světla (plamen, žhavé uhlíky). Aktivní hořlavina paliva (C, H, S) reaguje se vzdušným kyslíkem (O_2). Protože je tato reakce doprovázena uvolňováním tepla, nazýváme jí exotermní. Spaliny (produkty spalování) mají vysokou teplotu a my využíváme jejich teplo pro potřeby vytápění, ohřev vody nebo vaření. Ke spalovacím reakcím dochází při všech teplotách, přičemž její hodnota určuje rychlost reakce (čím vyšší teplota, tím větší rychlost). O hoření hovoříme tehdy, pokud je spalovací reakce doprovázena světelným efektem např. plamenem (teplota spalin dosáhne spektra viditelného pro lidské oko). Pokud je rychlost reakce vyšší než rychlost zvuku, hovoříme o výbuchu, ale jedná se také o hoření. Vybouchnout může i prach (uhelný, mouka apod.), ale z výše uvedeného je zřejmé, že pokud ve zvířeném prachu nebude hořlavina, prach nevybouchne.

Spalovací rovnice, které bilančně popisují reakci mezi hořlavinou a kyslíkem, zjednodušeně vyjadřují množství kyslíku (vzduchu), který je potřeba k tomu, aby došlo k jejich vzájemné reakci. Toto množství nazýváme stechiometrické (teoretické) a představuje minimální potřebu pro spalování v případě, že by se všichni sešli a všichni zreagovali. V tomto případě je přebytek spalovacího vzduchu n (poměr skutečného a teoretického množství) roven jedné. V reálném spalovacím procesu je toto množství nedostatečné. Proto ve většině případů je skutečné množství spalovacího vzduchu větší než teoreticky potřebné. Tím zvyšujeme pravděpodobnost toho, že se setkají (dokonalost spalování, minimalizace CO) a hovoříme o spalování s přebytkem spalovacího vzduchu (1,5 až 2 pro automatické kotle, 2 až 4 pro kotle a kamna s ručním přikládáním paliva). Se zvyšujícím se přebytkem spalovacího vzduchu ovšem postupně klesá teplota v ohništi, takže začne klesat i kvalita spalování, dále roste množství spalin, tím také roste komínová ztráta a snižuje se účinnost spalovacího zařízení. Každé zařízení má svůj optimální přebytek spalovacího vzduchu, při kterém je dosaženo optimálních hodnot koncentrace CO a účinnosti (viz Graf 4).



Graf 4 Vliv přebytku spalovacího vzduchu na účinnost a kvalitu spalování

Při reálném provozu měníme přebytek spalovacího vzduchu tím, jak regulujeme množství nasávaného spalovacího vzduchu. Takže pokud otevřeme dvířka popelníku, regulační klapky vzduchů apod., budeme se pohybovat v pravé části grafu. Pokud uzavřeme přívody spalovacích vzduchů, začne se snižovat přebytek spalovacího vzduchu a v grafu se přemísťujeme směrem vlevo. Jak moc se posuneme vlevo, záleží také na tom, jak dobře je spalovací zařízení těsné (těsnicí šňůry apod.). Pokud uzavřeme všechny přívody spalovacích vzduchů a nepozorujeme evidentní pohasnutí plamene (např. u krbových kamen to můžeme pozorovat přes sklo dvířek), tak se spalovací vzduch dostává k palivu netěsnostmi a my se stále pohybuje v pravé části grafu, což je doprovázeno vysokou komínovou ztrátou, a tedy nízkou účinností. Pokud je zařízení těsné, můžeme se po uzavření přívodu vzduchu dostat až do oblasti, kde je nedostatečné množství spalovacího vzduchu a vlastně začneme palivo zplyňovat. Toto se velmi často děje, pokud na noc přiložíme velkou dávku paliva a pak, protože jdeme již spát, všechny přívody vzduchů uzavřeme. Je pravda, že se podstatně prodlouží doba (hoření – zplyňování), ale křivka CO nám ukazuje, jak dramatickému nárůstu produktů nedokonalého spalování dojde a také účinnost je velmi špatná.

Křivka označená jako „O₂“ ukazuje průběh koncentrace kyslíku v závislosti na přebytku spalovacího vzduchu. Pokud bychom k palivu přivedli právě tolik vzduchu, kolik je třeba (přebytek $n = 1$), tak by se všechny přivedený kyslík spotřeboval, takže jeho koncentrace by byla nulová, to popisuje bod „A“. Při tomto stavu by také došlo k tomu, že veškerý uhlík by shořel na CO₂, takže jeho koncentrace by byla maximální, tehdy hovoříme o CO_{2max}, viz bod „B“. Se zvyšujícím se přebytkem spalovacího vzduchu poroste koncentrace kyslíku ve spalinách. Naopak koncentrace CO₂ bude klesat, protože přebytečný vzduch bude CO₂ ředit.

Se vzrůstajícím přebytkem spalovacího vzduchu se zlepšuje spalování, klesá koncentrace CO, ale na druhou stranu roste objem spalin, takže roste množství tepla vyvedeného komínem, a tedy klesá účinnost. Spalujeme proto s dostatečně vysokým přebytkem spalovacího vzduchu, abychom měli koncentrace CO na rozumné úrovni a přitom neměli příliš nízkou účinnost. Každé spalovací zařízení pro dané palivo má optimální hodnotu spalovacího vzduchu (viz plocha v grafu).

Zjednodušeně (záleží na složení) můžeme říci, že pro spálení jednoho kilogramu uhlí potřebujeme minimálně (teoreticky) cca 6 metrů krychlových vzduchu, pro spálení jednoho kilogramu dřeva to jsou cca 4 metry krychlové vzduchu. Pro technicky pokročilejší kotle, tedy automatické a zplyňovací, bývá přebytek spalovacího vzduchu cca 2 (tomu odpovídá obsah kyslíku ve spalinách cca 10,5 %), takže spotřeba vzduchu bude dvojnásobná ve srovnání s teoretickou, tj. cca 12 m³ na jeden kilogram uhlí. Kotle s ruční dopravou paliva (prohořivací a odhořivací) včetně krbových kamen, sporáků a krbových vložek spalují palivo s ještě větším přebytkem spalovacího vzduchu, obvykle mezi 2 až 4. U otevřeného krbu nedochází k regulaci přívodu spalovacího vzduchu, koncentrace kyslíku ve spalinách dosahuje dle fáze spalovací periody cca až kolem 20 %, což odpovídá hodnotě přebytku vzduchu cca 20. V tomto případě je již množství skutečného vzduchu, který se spotřebuje (je nasáno do krbu a odvedeno komínem) pro spálení jednoho kilogramu dřeva kolem 100 m³. Proto účinnost otevřených krbů je cca 10 %, což se výrazně projeví na velké spotřebě paliva.

Množství nasávaného vzduchu je dáno „výkonem odsávání komínu“. Komín pracuje jako kouřový ventilátor, který vysává spaliny z topeniště. Komínový tah vzniká na základě rozdílů hustot spalin a okolního vzduchu a jedná se o stejný jev, který nejdříve popsal pan Archimedes, když se koupal ve vaně. Základní parametry ovlivňující tah komínu jsou tyto:

- teplota spalin – množství přiloženého paliva a jeho složení, konstrukce spalovacího zařízení, tepelná izolace komínu;
- účinná výška komínu a jeho vnitřní průměr;
- tlaková ztráta celé spalinové cesty (průměr kouřovodu, množství a tvar napojovacích dílů, údržba-čištění).

Základní funkcí komína je bezpečně odvést spaliny, které vzniknou při spalování paliva v napojeném spalovacím zařízení.

V případě spalování pevných paliv zjednodušeně platí pravidlo, že množství vzniklých spalin je přibližně stejné jako množství nasátého spalovacího vzduchu.

Potřebné množství spalovacího vzduchu se dle typu a výkonu malého spalovacího zařízení pohybuje přibližně v rozsahu od 10 do 1000 m³/h. Této potřebě je také nutné přizpůsobit přívod vzduchu k danému zařízení, který je zajištěn nasáváním přes netěsnosti oken, dveří a přes větrací otvory (mimo případ s externím přívodem spalovacího vzduchu). Zvýšené požadavky na tepelnou izolaci mimo jiné zvyšují těsnost oken, ale také celých domů. Pokud v místnosti, kde je spalovací zařízení nainstalováno (kotel v kotelně, kamna v obývacím pokoji), není zajištěn dostatečný přívod spalovacího vzduchu, musí být vzduch přiveden samostatným přívodem z exteriéru. Většina nových kamen již má sveden přívod spalovacího vzduchu do jednoho centrálního místa (většinou vzadu nebo dole je vyvedena trubka o průměru cca 100 mm).

Výkony digestoří mohou dosáhnout několika set metrů krychlových vzduchu odsátého z prostoru kuchyně. V případě, že je spalovací zařízení umístěno ve stejné místnosti (obytné haly spojené s kuchyňským koutem nebo kuchyňským sporákem), mohlo by dojít k zpětnému tahu komínu např. kamen, protože výkon digestoře je větší než „výkon“ tah komínu. Tomuto stavu je nutné zabránit (dostatečný nebo externí přívod vzduchu).

3.1 Konstrukce spalovacího zařízení a rozvody spalovacího vzduchu

Velká část dnes používaných ohnišť (malých výkonů) používá rošt, jehož základní funkce je právě v umožnění přívodu spalovacího vzduchu (primárního) k palivu. Podstatné je, aby konstrukce spalovacího zařízení zajistila přívod okysličovadla přímo až k hořlavině. Nestačí jen přivést dostatečné množství spalovacího vzduchu do.

Dalším faktorem je **granulometrie paliva**. Tlaková ztráta vrstvy tříděného paliva (při stejné výšce) je podstatně menší než vrstva netříděného paliva, která obsahuje velké množství prachu (menších částic paliva), nemluvě o uhelných kalech (jen jemný prach). Kaly se míchají s vodou, aby nepropadly roštem do popelníku, nicméně prostupnost vzduchu je nulová, proto tuto vrstvu uživatelé rozrušují pohrabáčem (vytváření „komínu“), aby alespoň někudy mohl

spalovací vzduch projít. Kaly jako prachové palivo je vynikající pro velké uhelné kotle s práškovými hořáky, ale pokud nám jde o to, co vychází z našich komínů, jedná se o palivo naprosto nevyhovující (to, že se po nějaké době nekouří z komínu, neznamená, že palivo dobře hoří, jedovatý oxid uhelnatý jako hlavní parametr nedokonalosti spalování je plyn bezbarvý a bez zápachu, jeho koncentrace jsou v těchto případech na úrovni několika procent).

Většinou je teplota spalovacího vzduchu podstatně nižší než teplota plamene (plamen je hořící prchavá hořlavina a je složena převážně z uhlovodíků a z hořlavého plynu CO), což v praxi znamená, že jejich promíchání je obtížné (mají různé viskozity). Pokud se ovšem nepromíchají, nedojde k jejich vzájemné reakci a projdou vedle sebe spalovací komorou. Můžeme si to představit tak, že proud vzduchu narazí na oblast plamene a ten se chová jako by byl pokryt nepropustnou blánou (plachta na hladině vody v bazénu), takže přestože přivedeme dostatečné množství vzduchu do ohniště, kyslík s hořlavinou se nesejde, takže nemohou zreagovat. Technicky se tato komplikace v ohništi zmírňuje přehřevem spalovacího vzduchu (zmenšení odlišnosti viskozit), zvětšením vstupní rychlosti spalovacího vzduchu (trysky, větší rychlost poruší „blánu“ plamene) a optimalizací proudění (maximalizace víření je vlastně kombinací dvou výše uvedených opatření).

Hoření začíná na povrchu látek a pokud neshoří povrchová vrstva, nemůže hořet další. Tím se vysvětluje relativně pomalý průběh hoření. Dřevěné třísky hoří podstatně rychleji než větší špalky. Rychlost hoření souvisí s množstvím uvolněné energie a tím tedy s výkonem zařízení. Proto po příjezdu na „studenu“ chatu topíme nejdříve menšími kousky dřeva, ty mají větší povrch, rychleji hoří a tím získáme větší výkon s tím, že v první fázi vytápění nás netrápí celkem nízká účinnost spalovacího zařízení (vysoká teplota spalin znamená velkou komínovou ztrátu). U velkých uhelných kotlů se uhlí mele na prášek, protože má podstatně větší povrch než kusové uhlí.

3.2 Výše teploty

Čím větší teplota je v oblasti, kde se vyskytuje hořlavina a vzdušný kyslík, tím více se jim chce reagovat a tím se také zvyšuje rychlost reakce.

Po dosažení zápalné teploty začne hořlavina hořet. Zápalná teplota jednotlivých hořlavin se podstatně liší, např. u dřeva je to kolem 600 °C, u benzínu kolem 200 °C.

Složení hořlaviny paliva (poměr mezi uhlíkem, vodíkem a kyslíkem) ovlivňuje zásadním způsobem zápalnou teplotu paliva. Málo prouhelněná paliva (dřevo, lignit, hnědé uhlí) obsahují velké množství prchavé hořlaviny (směs uhlovodíků), které se snadno zapalují. Se zvyšujícím se obsahem uhlíku (černé uhlí, antracit) se množství prchavé hořlaviny výrazně zmenšuje, což komplikuje jejich zapalování. Koks představuje palivo s „nulovým“ obsahem prchavé hořlaviny, protože při koksování dochází (vysoká teplota bez přístupu vzduchu – termický rozklad) k uvolnění prchavé hořlaviny (koksárenský plyn) a odplyněný zbytek je uhlík s popelovinou. Dřevěné uhlí, které se používá na grilování, se v podstatě vyrábí stejně jako koks, jen jako vstupní surovina je použito dřevo a uvolněný plyn je dřevní plyn. To je důvod, proč se koks a dřevěné uhlí tak špatně zapalují. Proto papírem nebo nějakým

podpalovačem nejdříve zapálíme suché dřevěné třísky (větší povrch), ty zapálí větší kousky dřeva a tento hořící materiál zapálí uhlí či koks.

Spalování uhlí vyžaduje vyšší spalovací teploty. Až výroba roštů v 19. století umožnila rozšíření spalování uhlí. Do té doby se spíše spalovalo dřevo, protože bezroštová ohniště neumožnila dosáhnout vyšší teploty (cca nad 1000 °C), které jsou potřebné pro kvalitní spalování uhlí.

Pokud bychom se na hoření paliva podívali přes bilanci vstupů a výstupů, mohli bychom při nulových tepelných ztrátách vypočítat maximální (adiabatickou) teplotu (pro dřevo se vzduchem kolem 1980 °C). Reálná teplota plamene při spalování dřeva ve spalovacím zařízení se pohybuje přibližně v rozsahu 650 až 950 °C. Teploty dosažené v ohništích při spalování uhlí jsou cca 800 až 1200 °C.

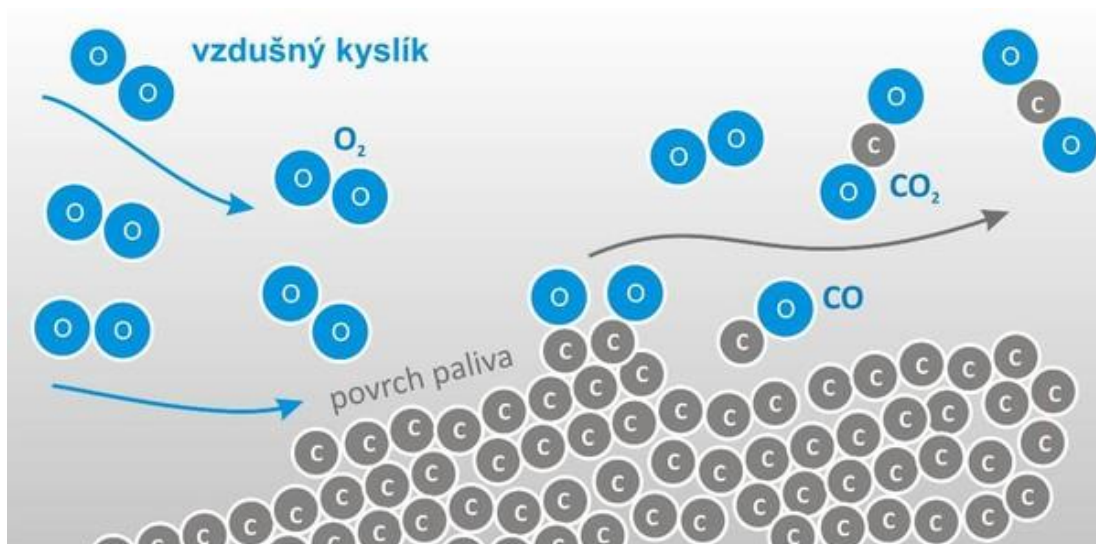
Souhrnně můžeme říci, že pokud se hořlavina s okysličovadlem setká, ale není vystavena dostatečné teplotě, k hoření nedojde anebo dojde jen k nedokonalému částečnému hoření. Se zvyšující se teplotou se rychlost a kvalita spalování zlepšuje.

3.3 Dostatek času a prostoru pro vzájemnou reakci

V oblasti spalování to znamená objem a uspořádání spalovací komory a celého spalovacího zařízení. Objem spalovací komory je přizpůsoben vlastnostem spalovaného paliva. Například při spalování paliv s větším obsahem prchavé hořlaviny (hnědé uhlí a biomasa) je velká část paliva tvořena hořlavým plynem (směs uhlovodíků), který se uvolňuje již při zahřátí paliva na dostatečnou teplotu cca 200 až 400 °C. Hořící plyn vnímáme jako plamen.

Každá reakce stejně tak spalovací reakce probíhá s jistou rychlostí, přičemž čím větší teplota tím větší je rychlost reakce, ale přesto dokončení reakce vyžaduje minimální čas, který je nutný pro úplné dokončení reakce. Po tento čas musí být naplněny všechny tři výše uvedené podmínky – musí tam být, musí se sejít a musí se jim chtít. Pokud k třem uvedeným podmínkám přidáme i dostatečný prostor, který poskytuje dostatečný čas pro oxidaci hořlaviny, dojde k její dokonalému spálení. Uhlík shoří na oxid uhličitý. Uhlovodíky, které tvoří prchavou hořlavinu shoří na CO₂ a vodní páru (H₂O) a síra shoří na SO₂.

Pokud je čas nedostatečný, bude reakce předčasně ukončena a nedojde k dokonalému vyhoření hořlaviny. Přesný průběh oxidace uhlíku není zcela znám, ale velmi zjednodušeně si jej můžeme představit tak, že uhlík částečně oxiduje na hořlavý plyn oxid uhelnatý (CO je jedovatý, bezbarvý plyn bez zápachu), který následně dohoří na CO₂. Schematicky hoření uhlíku zobrazuje Obrázek 2. Obdobně je tomu s uhlovodíky než shoří na CO₂ a H₂O.



Obrázek 2 Schématické zobrazení procesu hoření paliva – uhlíku

3.4 Nedokonalé spalování

O dokonalém spalování hovoříme tehdy, pokud veškerá hořlavina shoří (uhlík na CO_2 a uhlovodíky na CO_2 a vodu). Tato reakce může proběhnout dokonale, částečně anebo vůbec. Stejně tak je tomu i při spalování paliva, nic není dokonalé. Část uhlíku neshoří vůbec (černý popel, černé saze a popílek v komíně) a část uhlíku shoří jen na CO. Nedokonalé spalování identifikujeme dle produktů nedokonalého spalování, za které hlavně považujeme CO, saze a polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU). Nedokonalé spalování nastane, pokud jedna ze čtyř výše uvedených podmínek není zcela v pořádku. V dnešní době není problém změřit koncentraci CO (mobilní zařízení vlastní i některé kominické firmy) a získat tím představu o kvalitě spalování a kvalitě spalovacího zařízení.

Barva plamene svíčky je červená, protože jsou v něm hořící saze, barva plamene z plynového hořáku (zemní plyn nebo propan butan) je modrá, protože neobsahuje žádné saze a vodíkový plamen je modrý. Pokud však u plynového hořáku omezíme přívod vzduchu (např. u přenosného vařiče, který se používá na hory, zakryjeme trysky hořáku rukou nebo páskou), barva plamene se změní – částečně zčervená, což identifikuje nedokonalé spalování. Při přenášení hořící svíčky, můžeme pozorovat zvýšený vývin sazí (černé okraje plamene), protože vzduch proudící kolem plamene jej více ochlazuje a tím zhoršuje spalování, Svíčku sfouknutím zhasneme, protože proudící vzduch odvede teplo od knotu a zchladí plamen pod zápalnou teplotu. Pokud bude vnitřní povrch výfuku automobilu světle našedlý, bude to ukazovat na lepší spalování kapalného paliva v motoru ve srovnání s černým povrchem výfuku. Stejný princip platí u vzhledu částic, které se zachytávají v komínu za kamny či kotlem, ale i v samotném kotli na teplosměnných plochách.

CO je hořlavý plyn, takže pokud je jeho koncentrace vysoká (řádově v procentech), narůstá ztráta plyným nedopalem (pokud by CO v zařízení shořelo, tak by mohlo předat teplo, které by se využilo, ale protože neshořelo, nestalo se tak a tato energie „vyletěla komínem“) a snižuje se účinnost spalovacího zařízení.

4. Účinnost spalovacího zařízení, jak jí doma změřit

Jak již bylo uvedeno dříve, účinnost spalovacího zařízení vyjadřuje poměr mezi získanou energií (to, co jsme z toho získali, např. ve formě tepla z otopného tělesa – výkon) a přivedenou energií (to, co jsme do toho dodali, spálené palivo – příkon). Jedná se o přímou metodu stanovení účinnosti, která je ovšem pro běžného uživatele těžko aplikovatelná s ohledem na problematičnost stanovení výkonu.

Druhý pohled je nazýván jako nepřímá metoda stanovení účinnosti. Vychází z předpokladu, že ideální stroj či zařízení pracuje s účinností 100 %. Protože žádné reálné zařízení není perpetuum mobile, jeho účinnost je menší než 100 %. Je menší o energetické ztráty, takže můžeme říct, že účinnost je rovna 100 % minus suma jednotlivých ztrát [%].

Zjednodušeně můžeme u malých spalovacích zařízeních hovořit o těchto ztrátách:

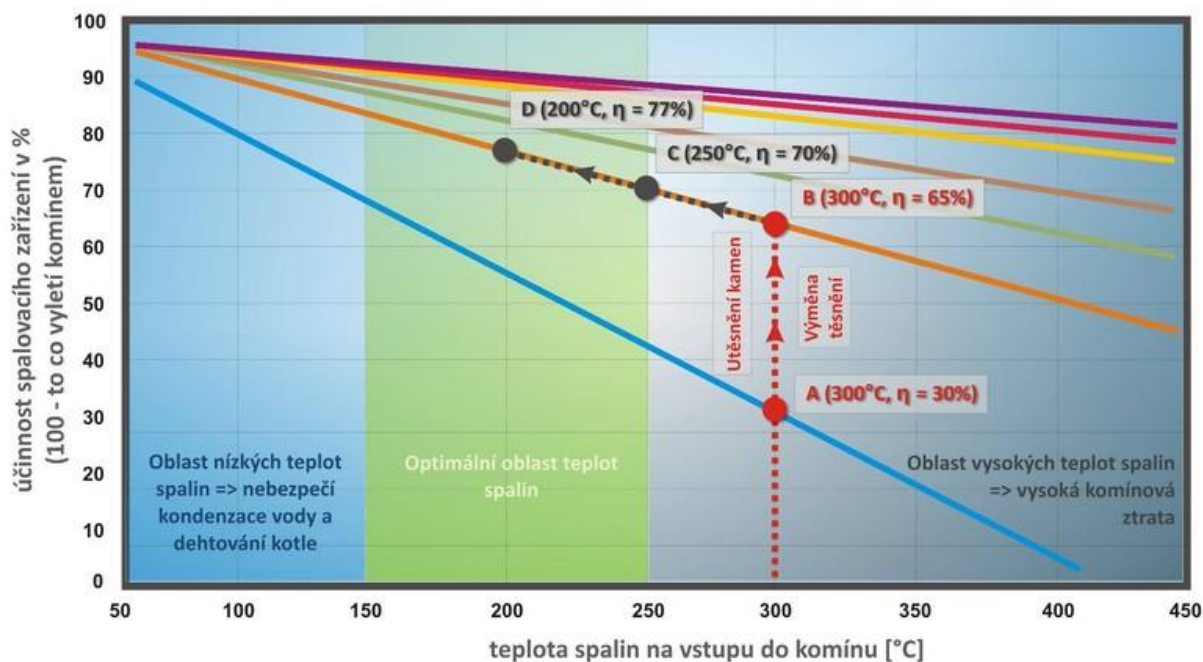
- **ztráta způsobená únikem hořlaviny v tuhých zbytcích** – černý popel obsahuje ještě hořlavinu, která by mohla hořet (při spalování koksu někdy dochází ke spékání a tato ztráta může dosáhnout více než 10 %, při spalování dřeva u krbových kamen můžeme počítat s hodnotou kolem 0,5 %).
- **ztráta způsobená únikem hořlaviny ve spalinách** (hořlavý plyn CO neshořel, a tedy neodevzdal svou energii). U krbových kamen při koncentraci CO do 0,1 % (velmi dobrá kamna) bude tato ztráta přibližně do 1 %, ale při koncentraci kolem 1 % CO může tato ztráta dosáhnout hodnot až 6 %.
- **ztráta způsobená únikem tepla v tuhých zbytcích** (pouze pokud bychom dávali ven horký popel z popelníku, který při chladnutí postupně odevzdá teplo do okolí, u zařízení s jednorázovou dopravou paliva do kotle a kamen k tomuto běžně nedochází, proto můžeme uvažovat s nulovou hodnotou).
- **ztráta způsobená odevzdáním tepla do okolí** – záleží na tepelné izolaci kotle, jak je teplý povrch, to se projeví tím, jak velké teplo je v kotelně, tato ztráta se běžně pohybuje do 1,5 %. U krbu, krbových a kachlových kamen, krbové vložky a kuchyňských sporáků se nejedná o ztrátu, protože to jsou zařízení, jejichž cílem je ohřívání vzduchu v místnosti, kde jsou instalována. U těchto zařízení se jedná o výkon zařízení, a to je to, co chceme a proč to děláme.
- **ztráta způsobená únikem tepla ve spalinách tzv. komínová ztráta** (ztráta citelným teplem spalin). Ta představuje část tepla, které tzv. „vyletí komínem“. U dobře pracujících spalovacích zařízení je tato ztráta naprosto dominantní (největší). Proto když se nyní budeme chtít naučit stanovit účinnost spalovacího zařízení, ve kterém doma topíme, budeme hovořit pouze o komínové ztrátě.

Zjednodušeně můžeme říci, že komínová ztráta nejvíce závisí na množství spalin a jejich teplotě. Teplotu spalin jsme schopni jednoduše změřit teploměrem. Ve většině obchodů, v nichž prodávají kamna, si můžete pořídit obyčejný „budíkový“ teploměr (rozsah alespoň do 400 °C), který umístíte tak, abyste změřili teplotu spalin vycházejících ze spalovacího zařízení (mezi spalovací zařízení a komín). Získáte tím první důležitý parametr pro stanovení účinnosti.

Druhým parametrem, který potřebujeme, je informace o množství spalin. Tato hodnota se získává obtížně, ale na druhou stranu souvisí s tím, kolik spalovacího vzduchu se do spalovacího zařízení nasává, tedy s jakým přebytkem spalovacího vzduchu pracujeme. Již jsme si vysvětlili, že každé spalovací zařízení má oblast s optimálním přebytkem spalovacího vzduchu, kde nejlépe pracuje. Také jsme hovořili o tom, že množství spalovacího vzduchu je ovlivněno nejen nastavením všech regulačních prvků (klapky apod.), ale že je důležité i to, jak jsou kamna či kotel těsné. Pokud uzavřeme všechny klapky a plamen hoří stále dál a viditelně nepohasne, je zřejmé, že vzduch je nasáván mimo tyto regulační prvky a nemá smysl je nastavovat, protože nic neregulují. Tyto netěsnosti je třeba nalézt a odstranit (většinou stačí vyměnit těsnicí šňůry ve dvířkách). Až budeme mít vzduch pod kontrolou – změna nastavení regulačních klapek se viditelně odrazí na velikosti a barvě plamene, můžeme těmito klapkami něco nastavit a ovlivnit.

Informace o teplotě a částečně o tom, jak těsné spalovací zařízení máme, nám postačí k tomu, abychom si orientačně stanovili, s jakou účinností palivo spalujeme. S pomocí Graf 5 budeme postupovat takto:

- Dle výsledku testu těsnosti a typu spalovacího zařízení si na Graf 5 vybereme jednu z křivek, která nejlépe odpovídá naší situaci. Jestliže máme klasická krbová kamna a při uzavření všech regulačních klapek se plamen nijak nezmenšil, naše kamna jsou velmi netěsná a přibližně to odpovídá modré křivce (18 % kyslíku ve spalinách). Znamená to, že množství vzduchu nasávané do kamen se mění jen dle toho, jaký je tah komínu, popř. jak máme nastavenou komínovou klapku. Pokud je komín v pořádku, můžeme předpokládat, že množství vzduchu je zbytečně velké a mnoho tepla jde do komínu.
- Během doby jednoho přiložení orientačně změříme průměrnou teplotu spalin za kamny. Např. naměříme teplotu 300 °C.
- Na ose x nalezneme teplotu spalin 300 °C a jdeme směrem nahoru až ke křivce (modrá), která označuje naše kamna – bod „A“. Na svislé ose odečteme hodnotu účinnosti 30 %.
- Výsledek nám tedy říká, že pokud máme netěsná kamna a teplota spalin se pohybuje okolo 300 °C (může to být běžný stav), využíváme teplo obsažené v palivu pouze s účinností 30 % (70 % energie vyhodíme). To jistě stojí za zamyšlení, protože 30 % je dost malá účinnost. Mimochodem, účinnost otevřeného krbu se pohybuje kolem 10 %. Neznamená to, že bychom se neohřáli, ale že ve srovnání s kamny o účinnosti např. 50 % spálíme v otevřeném krbu přibližně pětkrát více paliva.



Menší naředění spalin (méně vzduchu)		Větší naředění spalin (hodně vzduchu)	
—	kyslík = 0% (teorie)- minimum vzduchu	—	kyslík = 13% (klasická krbová kamna)
—	kyslík = 5% (automatický kotel)- málo vzduchu	—	kyslík = 16% (klasická krbová kamna)
—	kyslík = 7% (automatický kotel)	—	kyslík = 18% (netěsná krbová kamna, otevřený krb)
—	kyslík = 11% (těsná krbová kamna)		

Graf 5 Orientační závislost účinnosti spalovacího zařízení na jeho těsnosti a teplotě spalin

Pokud chceme snížit spotřebu paliva (zvýšit účinnost), graf nám názorně ukazuje, jaké máme možnosti pro zlepšení. Pokud přijdeme na to, kde máme největší netěsnosti a odstraníme je (většinou stačí vyměnit těsnící šňůru), můžeme se posunout na oranžovou křivku do bodu „B“. Tím jsme zásadním způsobem zvýšili účinnost z původních cca 30 % na 65 % a naše spotřeba paliva klesne na polovinu. Jak se to mohlo stát? Nehovoříme o tom, že budeme mít vzduchové klapky uzavřené, právě naopak, nyní klapkami regulujeme potřebné množství vzduchu, ale co se zásadně změnilo, je to, že jsme omezili přívod falešného vzduchu. Nyní je podstatně menší množství spalin, protože máme částečně vzduch pod kontrolou a regulujeme jeho množství klapkami (menší množství vzduchu znamená menší množství spalin a tím tedy i menší komínovou ztrátu).

Graf 5 naznačuje, jaké máme další možnosti zvýšení účinnosti. Pokud snížíme teplotu spalin, které vychází z kamen, snížíme množství tepla vycházejícího komínem ven, a tím opět zvýšíme účinnost. Teplotu spalin snížíme množstvím spalovaného paliva (musíme méně přikládat), nastavením vzduchových klapek a intenzitou chlazení kamen (u klasických krbových kamen to moc neovlivníme, u teplovodních kamen pomůžeme zvýšit průtok otopné vody, snížit teplotu vratné vody, u krbových vložek intenzitu chlazení zvýšíme otevřením všech klapek ohřívajícího vzduchu nebo zapnutím ventilátoru ohřívajícího vzduchu). Pokud teplotu spalin snížíme na hodnotu 250 °C, dostaneme se do bodu „C“, v němž jsme již na účinnosti kolem 70 %. Při teplotě 200 °C by byla účinnost kolem 77 % (bod „D“).

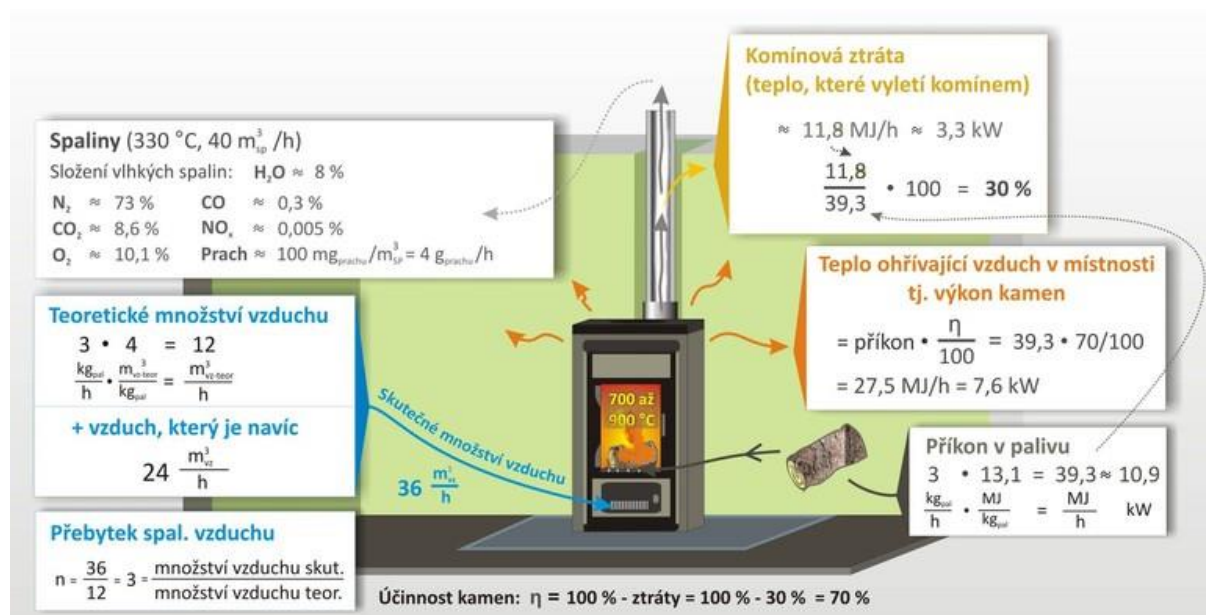
Teplotu spalin bychom u krbových kamen měli udržovat v rozsahu od 150 do 300 °C. U teplovodních kotlů by to mělo být cca od 150 do 250 °C. Pokud bude teplota moc vysoká,

„vyletí“ nám mnoho tepla komínem. Ale pozor, teplotu spalin nemůžeme snižovat donekonečna, protože pokud budou spaliny moc studené (pod 150 °C, záleží na složení spalin – obsah vody a SO₃), může dojít ke kondenzaci dehtů a vodní páry a při nízké teplotě spalin může být i problém s malým tahem komínu. Kondenzace snižuje životnost komínu a spalovacího zařízení. Opět se zde jedná o kompromis, kdy spalinám odebereme co nejvíce tepla pro potřeby vytápění, ale jen do té míry, aby nám nezkoroval kotel či kamna a „přežil“ komín (koroze, vlhnutí zdiva).

Tabulka 1 Orientační stanovení příkonu z hodinové spotřeby dřeva

Spotřeba dřeva kg/h	Surové dřevo w = 50%	1 rok sušené dřevo w = 30%	2 roky sušené dřevo w = 20%
	kW	kW	kW
2	4,0	6,2	7,3
3	6,1	9,3	10,9
4	8,1	12,4	14,6
5	10,1	15,5	18,2
6	12,1	18,6	21,9
7	14,1	21,7	25,5
8	16,2	24,8	29,1
9	18,2	27,9	32,8
10	20,2	31,0	36,4

Často se hovoří o tom, jaký výkon provozované spalovacího zařízení má. Zde je na místě selský rozum, který říká, že to hlavně bude záležet na tom, kolik paliva budeme spalovat, tedy na příkonu. Pokud si orientačně určíte hodinovou spotřebu paliva. Tabulka 1 znázorňuje, jaký příkon v kW to bude představovat. Pokud spálíme např. 3 kg suchého dřeva za hodinu, jedná se o příkon 39,3 MJ/h, což znamená příkon 10,9 kW. Při 70% účinnosti kamen bude jejich výkon 7,6 kW. Detailní bilanční rozbor této situace znázorňuje Obrázek 3.



Obrázek 3 Schematicky vyjádřená bilance spalování suchého dřeva v krbových kamnech

5. Produkce škodlivin z lokálních topenišť

V České republice bylo hnědé uhlí po dlouhou dobu hlavním palivem používaným k vytápění v lokálních topeništích. V posledních letech je i za pomoci tlaku legislativních autorit zaznamenán částečný přechod z uhlí na biomasu. Jednou z hlavních motivací odklonu od fosilních paliv jsou snahy o snížení emisí některých skleníkových plynů v rámci boje proti globálním změnám klimatu. Pozitivní vliv přechodu z uhlí na biomasu, například u emisí oxidů síry, je vzhledem k nižšímu obsahu síry v biomase neoddiskutovatelný. Otázkou je ovšem srovnání celkových emisí znečišťujících látek při spalování obou druhů paliv. Jako další významné polutanty zatěžující životní prostředí lze uvést zejména tuhé znečišťující látky (TZL) a persistentní organické polutanty (POP).

Emise znečišťujících látek z domácích topenišť výrazně přispívají k celkovému znečištění životního prostředí. Jejich vliv je dobře patrný například ze sezónních výkyvů koncentrací polycyklických aromatických uhlovodíků (PAU) získaných při dlouhodobých monitorovacích programech [10]. Některé zdroje uvádějí, že 35 % emisí primárních částic PM₁₀, 20–45 % emisí PAU a 30–35 % emisí polychlorovaných dibenzo-p-dioxinů a furanů (PCDD/F) v EU pochází z lokálních topenišť [11][12][13]. Zdrojem těchto čísel jsou emisní bilance vypočítané na základě stanovených emisních faktorů (EF) a odhadů spotřeby jednotlivých paliv v domácích topeništích.

V obecném měřítku existují dva faktory, které ovlivňují kvalitu ovzduší kolem nás:

- rozptylové podmínky,
- množství emisí znečišťujících látek.

Zatímco první faktor může lidská vůle jen těžko ovlivnit, na tom druhém má také svůj podíl společně s průmyslem a dopravou téměř 600 tisíc domácností, které jsou vytápěny spalováním tuhých paliv.

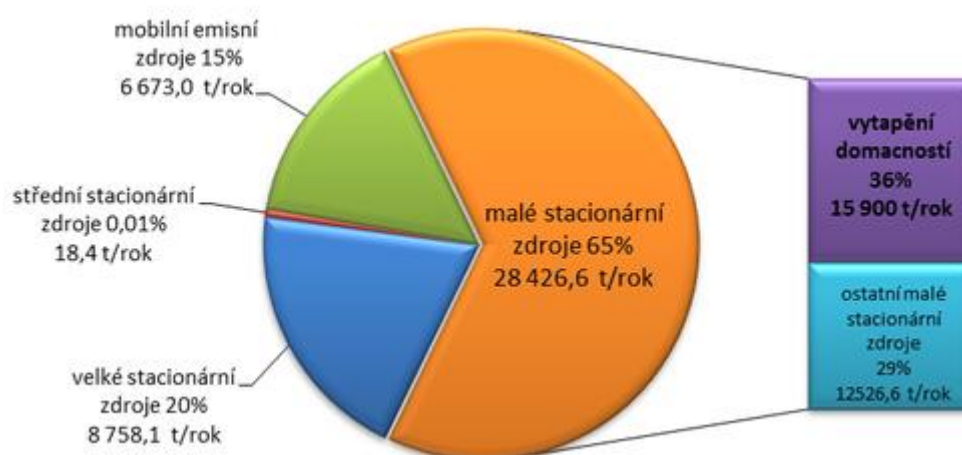
V domácnostech mají lidé čtyři pomyslné stupně volnosti neboli možnosti, jak optimalizovat vytápění vlastního domu. Jde o to, v čem spalujeme, co spalujeme, kdo topí (jak to umí) a jak se o spalovací zařízení a komín staráme. Každý z uvedených čtyř faktorů má zásadní vliv na množství emisí znečišťujících látek.

Vlastní bilance vychází ze spotřeby paliva a emisního faktoru, který vyjadřuje množství znečišťující látky emitované spálením jednotkové hmotnosti paliva (např. kg prachu na tunu paliva). Výše uvedené čtyři faktory zásadním způsobem (mnoho řádové rozdíly) ovlivní hodnotu emisního faktoru, a to představuje omezení samotné bilance. Bilance pracuje s „průměrnými“ hodnotami emisních faktorů, které odpovídají spalování předepsaného paliva, kvalitní obsluhou při jmenovitých podmínkách. Tyto podmínky v reálném provozu nastanou jen omezeně, a proto je pravděpodobné, že výsledky bilance emisí z lokálních topenišť jsou spíše podhodnoceny. Ve výsledcích bilance není zahrnuto spalování nekvalitních paliv, vliv špatné obsluhy ani vliv sníženého výkonu spalovacího zařízení včetně špatné údržby.

Každý z provozovatelů spalovacího zařízení může částečně ovlivnit množství emisí. Z pohledu produkce znečišťujících látek u starších kotlů (prohořivací a odhořivací), je lépe přikládat

častěji a menší dávku paliva. Po přiložení nechat palivo rozhořet, neuzavírat přívody spalovacích vzduchů. Moudrý člověk, pokud topí dřevem, tak je nechá vysušit aspoň dva roky, protože ví, že bude mít více tepla, spálí méně dřeva, méně se mu kouří z komínu a prodlouží životnost spalovacího zařízení.

Existuje mnoho znečišťujících látek, které jsou při spalování tuhých paliv emitovány. V současné době považujeme za nejproblematičtější emise prachu a polycyklických aromatických uhlovodíků (PAU). Dle bilance emisí tuhých znečišťujících látek (TZL) pochází více než 1/3 prachu z vytápění domácností. Podle dat z ČHMÚ (Graf 6) by se podílely české domácnosti na celkové produkci TZL 36 %. Jedná se o statistická data, která jsou poplatná použité metodice. Jedná se o průměrné roční hodnoty, které nijak nepostihují smogové situace.



Graf 6 Bilance emisí tuhých znečišťujících látek (TZL) v ČR pro rok 2015 dle ČHMÚ

Také použité emisní faktory představují průměrné hodnoty pro daný druh paliva. Tyto emisní faktory nijak nezahrnují vliv obsluhy spalovacího zařízení, vliv nekvalitního paliva ani vliv špatné údržby zařízení a komínu. Pracovníci Výzkumného energetického centra provedli rozsáhlou experimentální kampaň a navrhli nové emisní faktory pro jednotlivá paliva. Tabulka 3 uvádí hodnoty nově navržených emisních faktorů, včetně jejich porovnání s hodnotami emisních faktorů dnes používanými u nás a v Evropě. Tabulka 3 uvádí, kolik prachu vyprodukuje (vyletí komínem) jeden dům, který bude vytápěn spalováním tuhých paliv. Výsledky byly získány při spalování různých typů paliv (HU – hnědé uhlí, ČU – černé uhlí, buk, smrk, BIO pelety – vyšší hodnota byla z kukuřičné slámy a nižší z dřevních pelet), které byly spalovány v různých spalovacích zařízeních.

Výsledky ukazují na výrazný vliv typu spalovacího zařízení. Moderní kotle (automatické a zplyňovací) vyprodukují podstatně méně emisí znečišťujících látek, než kotle zastaralých konstrukcí (prohořivací a odhořivací). Výsledky nezohledňují nekvalitní obsluhu a špatnou údržbu, stejně tak zda spalované palivo bylo suchá biomasa anebo tříděné uhlí. Pokud bychom spalovali nekvalitní palivo (mokrý dřev, netříděné uhlí, odpady apod.) nebo špatně obsluhovali spalovací zařízení (špatně nastavení vzduchových klapky), došlo by podstatným způsobem k navýšení uvedených hodnot emisí prachu.

Tabulka 2 Porovnání stanovených emisních faktorů

EF na palivo	hnědé uhlí tříděné			černé uhlí tříděné			dřevo				
	EEA	používané	stanovené	EEA	používané	stanovené	EEA	používané	stanovené		
Tuhé emise	kg/t	g/kg	7,99	1,0*Ap (6,9)	15,2	11,3	1,0*Ap (18,9)	8,11	10,7	5,2	1,37
SO ₂	kg/t	g/kg	16,2	19,0 * Sp (14,1)	13,6 * Sp (10,1)	22,9	19,0 * Sp (10,0)	13,6 * Sp (7,2)	0,292	1	1,5
NO _x	kg/t	g/kg	1,98	2,0	2,0	2,80	2	4,7	1,09	0,70	1,13
CO	kg/t	g/kg	82,7	45	94,7	117	45	118	77,4	1	64,2
NMVO	kg/t	g/kg	8,71	8,9	20,9	12,3	8,9	18	13,5	0,89	11,5
CO ₂	t/t	kg/kg	x	x	1,64	x	x	2,74	x	x	1,42
PCB	mg/t	µg/kg	3,06	0,603	0,0434	4,33	4,77	0,118	0,000876	3,6	0,0412
PCDD/F TEQ	mg/t	µg/kg	0,0144	0,006	0,000767	0,0204	0,004	0,0105	0,0102	0,005	0,000371
HCB	mg/t	µg/kg	0,0112	0,125	0,0162	0,0158	0,125	57,9	0,0876	0,06	0,0652
Benzo(b)fluoranten	mg/t	µg/kg	5 936	1 150	2 470	8 398	1 600	4 560	3 212	3 260	698
Benzo(k)fluoranten	mg/t	µg/kg	2 338	525	2 380	3 308	50	3 170	1 898	1 080	531
Benzo(a)pyren	mg/t	µg/kg	4 137	845	5 860	5 853	1 500	7 460	3 066	2 480	1 400
Indeno(1,2,3cd)pyren	mg/t	µg/kg	1 979	1 110	2 410	2 799	3 000	4 850	2 044	1 760	794
4PAU	mg/t	µg/kg	14 389	3 630	13 120	20 360	6 150	20 040	10 220	8 580	3 423

Ap ... obsah popele v původním vzorku paliva (%_{hm})

Sp ... obsah síry v původním vzorku paliva (%_{sm})

Qi ... výhřevnost paliva (MJ/kg)

x ... hodnota není definována

(j) hodnoty uvedené v závorkách představují konkrétní vypočtené hodnoty EF pro TZL a SO₂ dle Ap a Sp v testovaných palivech

EEA - emisní faktory doporučené dle EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009 Part B - 1. A.4. small combustion

používané - emisní faktory používané ČHMÚ pro bilanci ČR

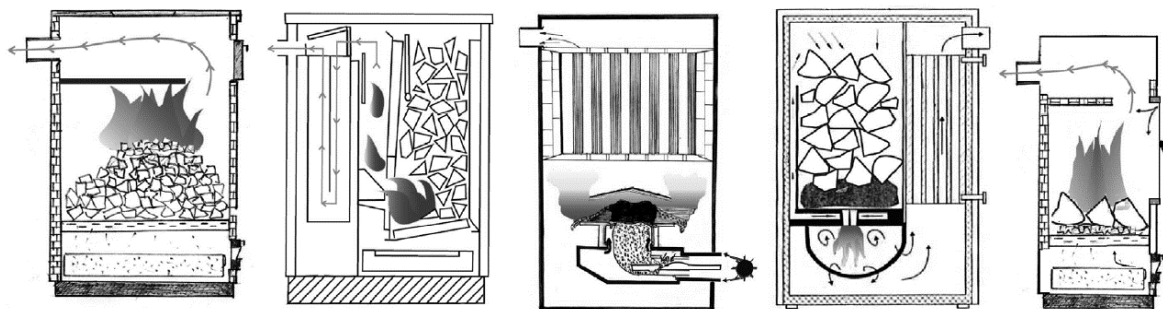
stanovené - emisní faktory, které byly navrženy dle experimentální kampaň, Výzkumným energetickým centrem

Tabulka 3 Roční produkce prachu při vytápění rodinného domu různými palivy dle spalovacího zařízení

Kolik prachu vyprodukuje jeden dům za rok při vytápění tuhými palivy? [kg _{prachu} /rok a dům]						
typ konstrukce zařízení	druh paliva					
	HU1	HU2	ČU	BUK	SMRK	BIO
automatický kotel	6	5	12			0,1 až 12
prohořivací kotel	249		59	16		
odhořivací kotel	32		52	15		
zplyňovací kotel 1	2			9		
zplyňovací kotel 2				2	10	
krbová kamna				7		

Tabulka 4 Odhad zastoupení typů spalovacích zařízení v ČR pro lokální vytápění dle konstrukce

Typ zařízení	Fosilní paliva	Biomasa
Prohořivací kotle	55,1	46,4
Odhořivací kotle	39,5	33,3
Automatické kotle	5,4	1,2
Zplyňovací kotle	-	16,8
Krbová kamna	-	2,3



Obrázek 4 Schéma spalovacích zařízení (zleva): prohořivací, odhořivací, automatický a zplyňovací kotel, krbová kamna

5.1 Vliv konstrukce zařízení a typu paliva na měrné emise

Emise znečišťujících látek z lokálních topenišť malých výkonů představují jeden z hlavních příspěvků k celkovému znečištění ovzduší. Vzhledem k současnému trendu přechodu z hnědého uhlí na biomasu je žádoucí stanovit vliv tohoto přechodu na emise některých polutantů. V práci jsou sledovány emise CO, TZL a vybraných POP ze spalování bukového dřeva a hnědého uhlí na nejčastěji používaných typech teplovodních kotlů v ČR. Sledován je, jak vliv konstrukce kotle, tak vliv paliva. Z výsledků vyplývá, že stěžejním faktorem ovlivňujícím úroveň sledovaných polutantů je samotná konstrukce teplovodního kotle. Výraznější vliv záměny uhlí za biomasu, i vzhledem k podobnému obsahu Cl, na emise POP pozorován nebyl.

5.1.1 Vliv konstrukce zařízení a typu paliva na měrné emise sumu polyaromatických uhlovodíků (PAU)

Vliv použitého paliva

ME sumy 4 PAU pro typická zařízení používaná v ČR a reprezentativní paliva pro ČR (hnědé uhlí – HU, černé uhlí – CU a dřevo – DREV) sumarizuje Tabulka 5. Zjištěné hodnoty měrných emisí (ME) pro jeden typ zařízení při použití různých paliv jsou vždy v rozsahu zhruba jednoho řádu. Konkrétní vliv paliva není možné nalézt. ME jsou spíše dány kombinací vhodnosti spalovaného paliva pro danou konstrukci spalovacího zařízení, jde tedy o nastavení kvality spalovacího procesu. Toto nastavení je u kotlů prohořivacích a odhořivacích problematické.

Vliv konstrukce spalovacího zařízení

Z výsledků, které uvádí Tabulka 5, je patrný značný vliv spalovacího zařízení na hodnoty ME PAU. ME PAU se např. při srovnání automatického kotle a prohořivacího kotle liší 30 až 1213krát podle spalovaného paliva. Nejvyšší ME jsou uváděny pro staré typy spalovacích zařízení na prohořivacím a odhořivacím typu spalování. ME PAU z moderních automatických či zplyňovacích zařízení jsou nejméně o jeden řád nižší. Podobné závěry je možné učinit i ze srovnání ME dalších produktů nedokonalého spalování, jako jsou CO, nemetanové těkavé organické látky (NMVOC) apod.

Tabulka 5 Měrné emise sumy 4 polyaromatických uhlovodíků (PAU) v g/t paliva

Typ zařízení	HU	ČU	Dřevo
Prohořivací kotle	31,3	22,5	5,14
Odhořivací kotle	6,00	19,3	2,78
Automatické kotle	0,0258	0,0699	0,135 ^a
Zplyňovací kotle	-	-	0,498 ^b
Krbová kamna	-	-	0,151

^a Stanoveno na nestandardním palivu (pelety z kukuřičné slámy)

^b Průměrná hodnota z měření na tvrdém dřevu (buku 0,0803 g.t⁻¹) a měkkém dřevu (smrk 0,916 g.t⁻¹)

5.1.2 Vliv konstrukce zařízení a typu paliva na měrné emise PCDD/F

Vliv použitého paliva

Ze srovnání ME pro jednotlivá spalovací zařízení a paliva reprezentativní pro ČR (Tabulka 4) vyplývá značný vliv paliva na hodnotu ME TEQ PCDD/F (rozdíly na úrovni několika řádů). Jedním z klíčových faktorů pro vznik PCDD/F je obsah Cl v palivu. Nejvyšší ME jsou uváděny pro černé uhlí s vysokým obsahem Cl (Cl v palivu až 1600 mg/kg suchého paliva). ME PCDD/F pro spalování hnědého uhlí a dřeva jsou na podobné úrovni, obsah Cl v těchto typech paliv je podobný, a to cca do 100 mg/kg suchého paliva. Z výsledků tedy vyplývá, že nízkých ME PCDD/F lze docílit spalováním paliv s nízkým obsahem Cl. Nárůst obsahu chloru v palivu bývá často dán i spalováním domovních odpadů v kotlích, což má za následek několikanásobný nárůst ME PCDD/F.

Vliv konstrukce spalovacího zařízení

Z uvedených výsledků ME PCDD/F (Tabulka 6) je ovšem patrné, že ani vliv spalovacího zařízení není možné zanedbat. Vliv konstrukce spalovacího zařízení je tedy stejně jako vliv paliva podstatný, ale z výsledků nelze zcela jednoznačně určit, která konstrukce spalovacího zařízení produkuje nejmenší množství PCDD/F. ME tedy budou dány souběhem vhodných podmínek (teplotní profil, kvalita spalování apod.) pro vznik PCDD/F daných jak zařízením, tak palivem.

Tabulka 6 Měrné emise PCDD/F v µgTEQ/t

Typ zařízení	HU	ČU	Dřevo
Prohořivací kotle	1,15	4,4	0,182
Odhořivací kotle	0,322	10,7	0,387
Automatické kotle	0,0740	71,5	12,1 ^a
Zplyňovací kotle	-	-	0,0702 ^b
Krbová kamna	-	-	0,159

^a Stanoveno na nestandardním palivu (peletky z kukuřičné slámy, obsah chloru 1100mg.kg⁻¹ suchého paliva)

^b Průměrná hodnota z měření na tvrdém dřevu (buku 0,0582 µg.t⁻¹) a měkkém dřevu (smrk 0,0823 µg.t⁻¹)

Závěry:

- Vliv spalovacího zařízení na emise sledovaných látek je nezanedbatelný, v případě PAU dokonce rozhodující.
- Emise PAU z moderních typů spalovacích zařízení (automatické, zplyňovací) jsou výrazně nižší než emise ze zařízení starších konstrukcí (prohořivací, odhořivací).
- Emise PCDD/F jsou úzce spjaty s obsahem Cl v palivu, nižší emise jsou z paliv s nízkým obsahem chloru, jako jsou hnědé uhlí či nekontaminované dřevo.
- Spalování českého hnědého uhlí v domácnostech produkuje ve srovnání s černým uhlím významně méně emisí PCDD/F. Dominantnějším problémem při spalování hnědého uhlí je produkce PAU, která je úzce spjata s kvalitou spalování.

Publikované hodnoty emisních faktorů se ale významně liší [14]. Příčinami velkého rozptylu zjištěných hodnot EF jsou hlavně různorodá spalovací zařízení a paliva, nehomogenita samotného spalovacího procesu v malém zdroji (kotli), opominutí některých důležitých faktorů ovlivňujících emise, a také nejednotná metodika prováděných experimentů a použitých postupů.

Celkové emise polutantů jsou dány spalovacím zařízením, jeho stářím, konstrukcí, charakterem chodu (periodický/neperiodický) apod. [15] Popsán je také například vliv četnosti přikládání u periodicky pracujících kotlů či vliv nižšího než nominálního výkonu na emise vybraných polutantů [16]. Uvedené skutečnosti jsou často v literatuře opomíjeny a je sledován čistě jen vliv paliva, důležitý je zejména obsah vlhkosti v něm. Čím vyšší je vlhkost paliva, tím je většinou nižší kvalita spalování a rostou emise TZL či PAU [16]. Pro emise chlorovaných POP je rozhodujícím faktorem obsah Cl v palivu. Například při spalování chlornatého polského černého uhlí byly zjištěny až řádově vyšší emise PCDD/F než z ostatních paliv [6]. Naopak vyšší koncentrace síry v palivu může tvorbu chlorovaných POP snížit, neboť síra inhibuje průběh katalytické Deaconovy reakce [17].

Stanovení emisí z lokálních topenišť je díky své komplexnosti metodicky velmi obtížné a je nutné se vypořádat s mnoha nestandardními podmínkami [18]. Důležité je dosažení správných isokinetických poměrů při odběrech, což je vzhledem k nízkým rychlostem spalin velmi obtížné. Z tohoto důvodu se používá různých ředících systémů pracujících na principu naředění spalin vzduchem o známém poměru. Odběr spalin je pak prováděn v ředícím systému, který je tomu konstrukcí i podmínkami přizpůsoben. Někdy je ovšem uváděn i vliv metodiky odběru, respektive použitého ředícího systému [19]. Z uvedených skutečností vyplývá, že celkové bilance a odhady emisí jednotlivých polutantů jsou zatíženy velkou nejistotou a další zpřesnění a systematické sledování je žádoucí.

5.1.3 Vliv spalování hnědého uhlí a bukového dřeva na celkové emise

Spalovací experimenty byly realizovány s hnědým uhlím (HU, ořech 1 ze Severočeských dolů, a.s.) a s bukovým dřevem (BUK, kusové dřevo – ¼ špalku o průměru cca 15 cm a délce cca 30 cm). Rozměry paliv byly typické pro použití v ČR. Hrubý a prvkový rozbor obou paliv je uveden v Tab. 1. Z hlediska vzniku chlorovaných POP je důležitý obsah Cl a částečně také S. Obsah Cl je u obou paliv podobný, síry je cca 3x vyšší množství v hnědém uhlí než v bukovém dřevu.

Tabulka 7 Hrubý a elementární rozbor surového paliva

Parametry paliva	HU	BUK
Vlhkost (hm. %)	27,5	9,6
Popel (hm. %)	4,2	0,83
Hořlavina (hm. %)	68,3	89,6
Q _n (MJ/kg)	20,6	17,0
Q _i (MJ/kg)	19,1	15,7
C (hm. %)	46,9	41,1
H (hm. %)	3,83	5,11
N (hm. %)	0,65	0,09
O (hm. %)	16,4	43,1
S (hm. %)	0,62	0,22
Cl (mg/kg)	58	67

Spalovací testy

Spalovací testy byly realizovány přibližně při jmenovitém výkonu dle postupů uvedených v EN 303-5. Každý spalovací test začal zapálením paliva, po zapálení byl spalovací proces veden tak, aby bylo dosaženo jmenovitého výkonu kotle co nejdříve. Kotel byl následně při jmenovitém výkonu provozován po dobu cca 2 hodin. Reprezentativní odběry a vzorkování spalin následovaly teprve po této dvouhodinové periodě. Délka spalovací periody se lišila dle spalovaného paliva. Při spalování uhlí byla délka jedné periody cca 4 hodiny.

- prohořivací (starý typ zařízení s manuálním přikládáním, bez nuceného tahu spalovacího vzduchu; celá dávka paliva hoří najednou na roštu ve spalovací komoře; zařízení pracuje se spalovací periodou),
- odhořivací (starší typ zařízení s manuálním přikládáním, bez nuceného tahu spalovacího vzduchu; kotel je rozdělen na dvě části – násypnou šachtu a spalovací komoru, částečné sušení, odplynění paliva a spalování probíhá i v násypné šachtě u hrany se spalovací komoru, hlavní část spalování ale probíhá až ve spalovací komoře),
- automatický (moderní odhořivací kotel s quasi-kontinuálním dávkováním paliva šnekovým podavačem a nucenou dopravou spalovacího vzduchu ventilátorem; spalovací část kotle je tvořena roštem, deflektorem tepla a retortou) a
- 2 typy zplyňovacích kotlů – na uhlí a na biomasu – lišící se konstrukcí hořáku a velikostí spalovací komory (moderní zplyňovací kotel s manuálním dávkováním a nuceným odtahem spalin odtahovým ventilátorem; kotel je tvořen zásobníkem paliva, roštem a pod ním umístěnou spalovací komorou).

TZL, CO a PAU

Zjištěné emisní faktory nechlorovaných produktů nedokonalého spalování (např. CO, PAU) uvádí Tabulka 8. Z výsledků jsou patrné vysoké emise CO a PAU ze starých typů kotlů pracujících s prohořivacím a odhořivacím principem.

Tabulka 8 Emisní faktory CO, TZL a PAU

Typ kotle		TZL	CO	PAU
		(g/GJ)	(g/GJ)	(g/GJ)
prohořivací	HU	1260	58760	5,21
	BUK	100	4840	2,16
odhořivací	HU	256	4320	2,08
	BUK	95,2	4170	1,12
automatický	HU	46,6	450	0,0110
zplyňovací	HU	16,8	132	0,0299
	BUK	14,7	237	0,0441

PAU – suma 10 kongenerů - fluoranten, pyren, benzo(a)antracen, chrysen, benzo(b)fluoranten, benzo(k)fluoranten, benzo(a)pyren, benzo(g,h,i)perylene, dibenzo(a,h)antracen, indeno(1,2,3-cd)pyren.

Vůbec nejvyšší emise byly zjištěny při spalování hnědého uhlí v prohořivacím kotli pracujícím se spalovací periodou. Příčinou takto vysokých hodnot je synergická kombinace vlastností hnědého uhlí a prohořivacího kotle.

Druhá nejvyšší hodnota EF byla zjištěna při spalování bukového dřeva na prohořivacím kotli. Všechny nevýhody prohořivacího kotle se uplatňují i při spalování bukového dřeva, rozdíl v emisích je dán hlavně rychlejším odplyněním dřeva oproti uhlí a snazším prostupem vzduchu skrze vrstvu paliva. Jen mírně nižší EF byly zjištěny u odhořivacího kotle. V tomto typu konstrukce kotle dochází alespoň částečně odděleně k odplynění paliva a následnému spalování plynných produktů. V odhořivacím kotli dále neprocházejí spaliny skrze celou vrstvu přiloženého paliva, takže kvalita spalování paliv s vysokým obsahem prchavé hořlaviny je vyšší než v kotli prohořivacím (ten je určen primárně pro palivo s nízkým obsahem prchavé hořlaviny).

Nejnižší hodnoty EF byly zjištěny z obou typů moderních zařízení, a to z automatického a zplyňovacího kotle. U automatického kotle je spalovací proces nejlépe řízen, a to jak regulací dávkování paliva šnekem, tak pomocí regulace výkonu spalínového ventilátoru. Tep-lota ve spalovací komoře je v tomto kotli také dostatečně vysoká, v blízkosti deflektoru dosáhla teplota až cca 1000 °C, na vstupu do tepelného výměníku (tj. na výstupu ze spalovací do post-spalovací zóny) pak bylo naměřeno cca 600-800 °C. Podobně nízké emise znečišťujících látek byly zjištěny i z moderních zplyňovacích kotlů. I u tohoto typu zařízení je ve spalovacím komoře dostatečně vysoká teplota, a to kolem 1000 °C. Teplota v zásobníku paliva pak dosahuje 200-400 °C, což způsobí předsušení a odplynění paliva. Spalován je následně až vzniklý plyn.

PeCBz a HxCBz

Ve spalínách byly sledovány také emise he-xachlorbenzenu (HxCBz) a pentachlorbenzenu (PeCBz), jakožto nového POP dle Stockholmské konvence. Velmi podobné hodnoty EF byly zjištěny při všech spalovacích pokusech (viz Tabulka 9). Klíčovým faktorem pro emise chlorovaných látek je obsah Cl v palivu, který byl jak u hnědého uhlí, tak u bukového dřeva velmi podobný. Mírně vyšší EF HxCBz byl za-znamenán jen u spalování bukového dřeva v prohořivacím kotli, což bude pravděpodobně dáno celkově nízkou kvalitou spalování.

Překvapivě byl zjištěn vyšší EF HxCBz také pro buk spalovaný ve zplyňovacím kotli. Identifikovat příčinu tohoto jevu se zatím nepodařilo.

Tabulka 9 Emise PeCBz a HxCBz

Typ kotle		PeCBz	HxCBz
		(µg/GJ)	(µg/GJ)
prohořivací	HU	-	-
	BUK	0,488	2,40
odhořivací	HU	0,796	0,852
	BUK	0,198	0,575
automatický	HU	0,447	0,676
zplyňovací	HU	0,089	0,524
	BUK	0,694	10,6

PCB a PCDD/F

Stanovené hodnoty emisních faktorů toxického ekvivalentu (I-TEQ) polychlorovaných bifenyľů (PCB) a TEQ PCDD/F uvádí Tabulka 10. Podobně jako u CO či PAU byly i u PCB a PCDD/F zjištěny vyšší emise z obou kotlů starých typů (tj. prohořivacího a odhořivacího). Z novějších kotlů (automatického a zplyňovacího) byly stanoveny emise přibližně o jeden řád nižší. Vliv spalovacího zařízení je tedy nesporný, neboť na-příklad emise PCDD/F ze spalování hnědého uhlí v prohořivacím kotli jsou cca 20 x vyšší než ze zplyňovacího kotle. Vliv spalovaného paliva už tak jednoznačný není. U prohořivacího kotle byly zjištěny cca 5 x vyšší emise ze spalování hnědého uhlí než z bukového dřeva. V případě odhořivacího kotle je zjištěný trend opačný a zhruba o 50 % vyšší emise PCDD/F byly zjištěny při spalování bukového dřeva. U odhořivacích kotlů pak byly zjištěné hodnoty EF PCDD/F prakticky totožné pro obě paliva. Relativně podobné hodnoty EF ze spalování obou paliv na jednotlivých kotlích jsou dány také podobným obsahem chloru. Při dříve provedených experimentech s černým polským uhlím s obsahem Cl 0,2 hm. % byly stanoveny podstatně vyšší emise I-TEQ PCDD/F, a to na úrovni 140-2200 ng/GJ dle použitého typu kotle [6]. Z toho je patrné, že výrazné zvýšení emisí chlorovaných látek lze očekávat například při přidavku odpadu s obsahem chloru ke spalovanému palivu.

Tabulka 10 Emisní faktory I-TEQ PCB a PCDD/F

Typ kotle		I-TEQ PCB	I-TEQ PCDD/F
		(ng/GJ)	(ng/GJ)
prohořivací	HU	2,46	60,6
	BUK	1,3	11,6
odhořivací	HU	0,575	16,9
	BUK	1,37	24,7
automatický	HU	0,234	3,88
zplyňovací	HU	0,229	3,16
	BUK	0,211	3,36

Ze získaných výsledků vyplývá, že v případě polutantů sledovaných v tomto článku je důležitějším faktorem typ kotle, ve kterém je palivo spalováno, než samotný typ paliva. Výjimkou jsou emise TZL, které jsou na starých typech zařízení násobně vyšší ze spalování uhlí než z biomasy.

Emise chlorovaných POP látek byly z obou typů paliv přibližně stejné, což je dáno i velmi podobným obsahem Cl v palivu. Také u emisí těchto látek je důležitým faktorem typ kotle. Platí, že z moderních zařízení jsou emise chlorovaných POP nižší než ze starých typů zařízení.

5.1.4 Porovnávání emisí při spalování různých druhů dřeva

Jako zdroj tepla byl použit krb o jmenovitém výkonu 6kW, který je znázorňuje Obrázek 5. Na dně spalovací komory je rošt a pod ním je nádoba, kam padá popel. Přístup do spalovací komory je přes dveře, které jsou zaskleny vysoce tepelně odolným sklem. Během spalovacích zkoušek musí být dvířka vždy uzavřena, aby se zabránilo rychlému spálení paliva a přehřátí zařízení.

Při experimentálním měření všech vzorků byla stanovena i produkce oxid uhelnatý (CO) a oxidy dusíku (NOx). Produkce CO a NOx byla stanovena analyzátozem emisí a tyto hodnoty byly zapsány pomocí záznamníku v intervalu 20 sekund v souladu s prací Orzechowski & Orman (2006) a Vitažek et al. (2011, 2013).



Obrázek 5 Krb o jmenovitém výkonu 6 kW

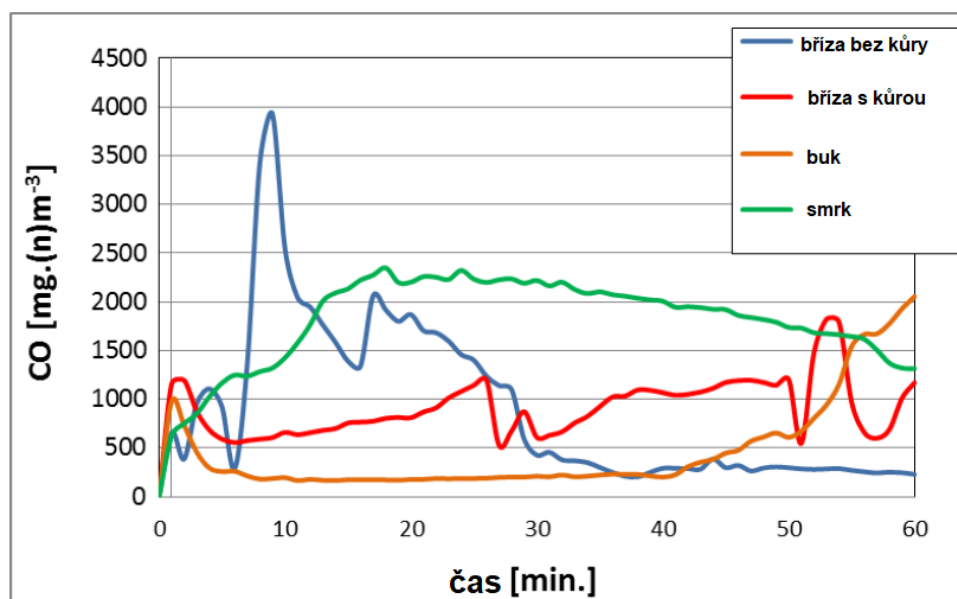
Během experimentu byly testovány různé druhy dřeva. Každé měření trvalo 1 hodinu a bylo spáleno asi 1,5 kg paliva. Pro experimentální měření byly použity následující druhy dřeva, které uvádí Tabulka 11.

Tabulka 11 Výhřevnost a vlhkost použitých druhů dřeva

Typ paliva	Výhřevnost [MJ.kg ⁻¹]	Vlhkost [%]
Bříza s kůrou	18,1	18,15
Bříza bez kůry	19,2	17,21
Buk	17,5	7,64
Smrk	19,3	7,87

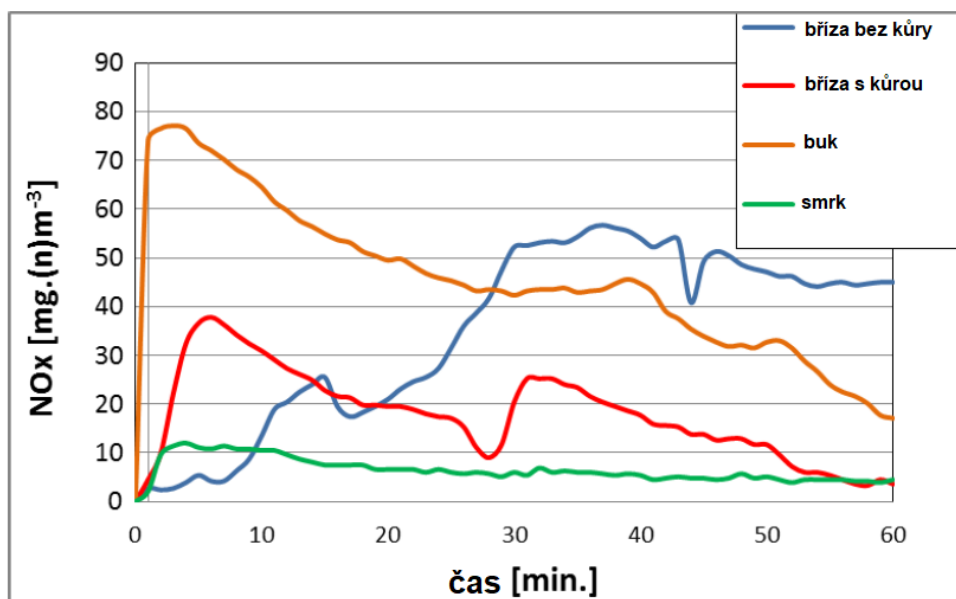
Tvorbu emisí do značné míry ovlivňuje druh paliva, které se spaluje v tepelném zdroj. Každé palivo má jiné vlastnosti a chemické složení, které v konečném důsledku ovlivňuje spalovací proces, množství skutečných emisí a obsah popela. Při experimentálních měřeních byly zajištěny stejné spalování podmínky, tedy rovnoměrný přívod primárního, sekundárního a terciárního vzduchu, stejný tlak v komíně (12 Pa) a maximální dávka paliva 1,5 kg.

Časový průběh produkce CO znázorňuje Graf 7. Nejnižší produkce CO byla měřena při spalování buku, kde průměrná produkce CO byla 473,25 mg.(n)m⁻³. Nejvyšší produkce CO byla naměřena při spalování smrku kde průměrná produkce CO byla 1820,6 mg.(n)m⁻³. Průměrná produkce CO byla 905,45 mg.(n)m⁻³, resp. 916,25 mg.(n)m⁻³ při spalování břízy bez kůry, resp. břízy s kůrou.



Graf 7 Časový průběh produkce CO

Časový průběh produkce NO_x znázorňuje Graf 8. Nejnižší produkce NO_x byla naměřena při spalování smrku, kde průměrná produkce NO_x byla 6,53 mg.(n)m⁻³. Nejvyšší produkce NO_x byla naměřena při spalování buku, kde průměrná produkce NO_x byla 45,85 mg.(n)m⁻³. Průměrná produkce NO_x bylo 34,97 mg.(n)m⁻³, resp. 17,98 mg.(n)m⁻³ při spalování břízy bez kůry, resp. břízy s kůrou.

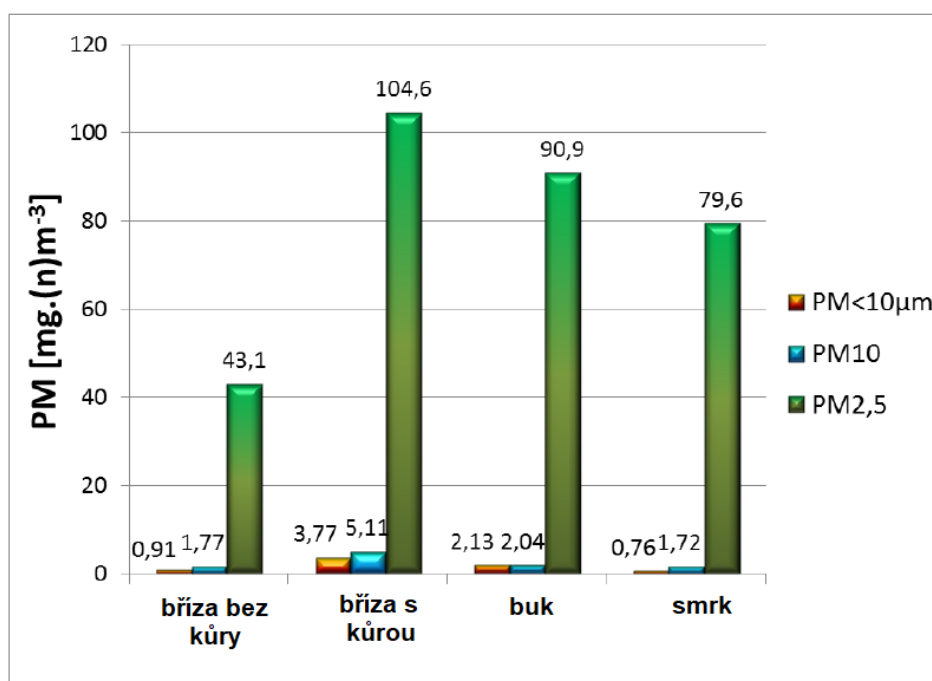


Graf 8 Časový průběh produkce NO_x

Měření částic bylo prováděno na všech typech dřeva po dobu 30 minut. Během této doby byly zachyceny filtrem vzorky PM. Ty byly následně zbaveny vlhkosti a zváženy. Koncentrace pevných částic byly stanoveny rozdílovou hmotností všech tří filtrů (PM <10 μm, PM₁₀ a PM_{2,5}) před a po měření.

Produkce PM znázorňuje Graf 9. Největší množství pevných částic bylo pozorováno u měření břízy s kůrou, kde byla celková produkce PM 113,44 mg.(n)m⁻³.

Nejnižší množství pevných částic bylo pozorováno v měření břízy bez kůry, kde celková produkce PM byla 45,77 mg.(n)m⁻³. Celková produkce PM při spalování buku, resp. smrku byla 95,11 mg.(n)m⁻³, resp. 82,05 mg.(n)m⁻³.



Graf 9 Produkce PM

Znalost míry produkce emisí zejména produkce PM během spalování v malých domácích topeništích je velmi důležitá, proto musí být tato zařízení před použitím certifikována. Emisní limity jsou stále přísnější a běžné krby je nespĺňují a je nutné hledat řešení snížení produkce emisí, zejména produkce PM. Z provedených měření je patrné, že na tvorbu emisí má velký vliv druh použitého paliva.

Jako nejlepší palivo byla vybrána bříza bez kůry. Pro spalování břízy s kůrou, bukem a smrkem v testovaném krbu je nutné použití filtru nebo zařízení pro snížení produkce PM a dodržování požadavků na emisní limity pro tvorbu PM.

5.2 Vliv typu kotle, tepelného výkonu a spalovaného paliva na emisní faktory znečišťujících látek

Podle odhadů Světové zdravotnické organizace (WHO) je znečištění ovzduší prachovými částicemi (PM) odpovědné za snížení průměrné délky života téměř o devět měsíců občanů Evropské unie (EU). PM se do lidského těla dostávají především dýchacím systémem. Velikost PM je rozhodujícím faktorem ovlivňujícím jeho průnik a ukládání v dýchacím traktu. Větší PM se zachycují v horních cestách dýchacích, odkud je lze částečně vykašlat a částečně spolknout. Menší PM se ukládá v plicích. Více než dvě třetiny emisí PM ve velikostní třídě pod 2,5 μm ($\text{PM}_{2,5}$) jsou ve vyspělých zemích spojeny s antropogenními zdroji. Spalování různých tuhých paliv v různých typech malých topných spotřebičů je oblíbenou formou vytápění rodinných domů. Tyto typy spalovacích procesů však vypouštějí velké množství škodlivých plyných emisí a emisí PM. PM z různých zdrojů se liší svými fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Podle současných poznatků je nejdůležitější vlastností ovlivňující jeho škodlivost chemické složení, i když vliv má i tvar a velikost. Bylo uvedeno, že PM ze spalovacích zdrojů patří mezi nejrizikovější, protože obsahují škodlivé znečišťující látky, např. polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU), polychlorované bifenyly (PCB), polychlorované dibenzo-para-dioxiny a furany (PCDD/F) a přechodné kovy. Epidemiologické studie ukazují, že TZL vznikající v malých tepelných spotřebičích obsahují karcinogeny a mutageny a mohou tak mít nežádoucí a škodlivé dopady na zdraví [53][54].

Kvalitu spalování ovlivňuje technologie spalování, obsluha uživatele a používané palivo, což vše má dopad na tvorbu emisí. Palivo přispívá k celkovým emisím PM zejména v kotlích, kde je spalovací proces dobře řízen a emise pocházející z nedokonalého spalování jsou nízké. Charakteristiky paliv se od sebe výrazně liší, což ovlivňuje jak chování při spalování, tak i emise. Emise pevných částic z malých kotlů na dřevo (topení pro domácnost) dosahují obvykle 33–320 mg/MJ, zatímco emise z kotlů na uhlí jsou přibližně v rozmezí 15–400 mg/MJ. Dále platí, že kotle při provozu na snížený výkon pracují méně efektivně a vypouštějí více částic a škodlivých plyných sloučenin pocházejících z nedokonalého spalování [55][56][57].

V současné době je velká pozornost věnována spalování různých druhů paliv z biomasy, jelikož energie z biomasy je obnovitelná a má menší dopady na ŽP. Většina studií se zaměřuje na paliva z biomasy a jejich emise, ačkoli jsou k dispozici i moderní zařízení využívající spalování uhlí. Proto je důležité získat další informace o emisních charakteristikách spalování biomasy i fosilních paliv a vlivu technologie spalování.

Pro experimentální měření byla použita nejvíce používaná spalovací zařízení pro domácnosti ve východní Evropě. Jednalo se o pět různých typů kotlů (automatický kotel, prohořivací kotel, odhořivací kotel a dva typy zplyňovacích kotlů), které představují technologie pro spalování v obytných domech. Kotle byly vytápěny různými palivy (hnědé uhlí, mokré a suché dřevo, dřevěné pelety a směsné palivo) a emise ze spalování byly měřeny jak při nominálních, tak i snížených výkonech. Zkoumané emise zahrnovaly CO, organické plynné sloučeniny (OGC) a pevné částice (PM). Ke stanovení emisí PM byly použity cyklon a nízkotlaký impaktor. Bylo zjištěno, že emisní faktory pro CO, OGC, a PM závisí více na typu kotle a režimu provozu (snížený nebo jmenovitý výkon) než na druhu paliva. Údaje z nízkotlakého impaktoru Dekati (DLPI) ukazují, že ve většině případů PM1 představuje přibližně 80 % celkové hmotnosti PM. PM_{0,1} představuje 15–30 % (moderní kotle) nebo 5–10 % (kotle starého typu) z celkové hmoty PM. Z porovnaných výsledků je patrné, že emisní faktory pro PM získané cyklonem byly vyšší než emisní faktory získané pomocí DLPI.

Spalovací zkoušky byly provedeny se šesti různými palivy: lignit (L1 a L2), vlhká smrková polena (WW), suchá smrková polena (DW), dřevěné pelety (WP) a směsné palivo (MF). Palivo MF byla směs lignitu, vlhké smrkové kulatiny a dřevěné štěpky, které byly umístěn do PET lahví. Dřevěné třísky byly namočené v rostlinném oleji na smažení asi 14 hodin před testováním. Toto palivo představovalo extrémní typ paliva, které je však nelegálně používané v některých regionech České republiky.

Tato vybraná paliva představují hlavní druhy používaných tuhých paliv k vytápění domácností v ČR. Přibližný poměr jednotlivých složek paliva MF byl následující: L1, 44 %; WW, 34 %; čipy, 9 %; olej na smažení, 13 %. Základní složení a výhřevnost paliv byly stanoveny před spálením každého paliva (Tabulka 12). V případě paliva MF byly elementární složení a výhřevnost vypočteny ze znalosti jeho jednotlivých složek a výsledného hmotnostního poměru v palivové náplni.

Tabulka 12 Specifikace použitých paliv

parametry paliva	lignit L1	lignit L2	vlhká smrková polena WW	směsné palivo MF	dřevěné pelety WP	suchá smrková polena DW
uhlík [%]	54,62	61,72	34,15	45,62	47,43	45,19
vodík [%]	4,46	5,10	4,35	4,82	6,10	5,75
dušík [%]	0,76	0,90	0,06	0,40	0,04	0,08
kyslík [%]	19,05	14,44	29,85	26,57	40,00	39,50
síra [%]	0,72	1,36	0,02	0,36	0,05	0,03
voda veškerá [%]	15,51	9,04	31,20	19,88	6,00	8,98
popel [%]	4,87	7,45	0,37	2,35	0,39	0,49
výhřevnost [MJ/kg]	22,61	25,84	11,89	20,13	17,02	16,52

Provozní podmínky pro celkem 25 experimentů byly provedeny s 5 různými kotli, různými palivy a s použitím jmenovitých a redukovaných výkonů. Vzhledem k velmi odlišné povaze

kotlů a paliv se teploty spalin mezi experimenty značně lišily. Nejnižší teplota spalin v SP1 byla 114 °C, měřeno od B5 s mokrou smrkovou kulatinou (Tabulka 13). Nejvyšší teplota spalin byla 336 °C měřena z B2 se směsným palivem.

Tabulka 13 Shrnutí základních parametrů při spalovacích zkouškách

Palivo	Test č.	Výstup [kW]	P_{nom} / P_{min}	TSP1 [°C]	TSP2 [°C]	O2SP1 [vol. %]	DR [-]	TD [h]	DLPI rozsah [%]	
B1 – automatický kotel										
L2	1	7,6	P_{min}	133	40	15,8	5,7	1	4,38	72,6
L2	2	23,9	P_{nom}	238	64	11,2	4,5	1	4,25	56,9
WP	3	7,7	P_{min}	128	68	14,6	7,4	1	4,52	78,6
WP	4	24,8	P_{nom}	219	73	8,0	4,4	1	4,48	65,8
B2 – prohořivací kotel										
DW	5	8,8	P_{min}	133	36	10,3	12,0	1	3,65	5,7
DW	6	19,0	P_{nom}	294	101	12,5	3,4	3	4,83	10,4
MF	7	10,7	P_{min}	149	38	12,6	7,9	1	4,00	4,4
MF	8	23,8	P_{nom}	336	103	10,0	3,5	2	4,07	14,2
L1	9	9,0	P_{min}	130	35	11,7	10,7	1	5,05	8,9
L1	10	18,8	P_{nom}	293	94	11,7	4,0	1	4,23	19,3
WW	11	9,0	P_{min}	127	38	12,7	7,7	2	5,18	6,7
WW	12	14,1	P_{nom}	231	95	15,6	2,7	2	3,60	17,4
B3 – odhořivací kotel										
DW	13	7,5	P_{min}	161	69	11,7	14,4	1	4,63	35,3
DW	14	15,2	P_{nom}	208	75	14,6	3,5	1	4,38	31,1
MF	15	8,4	P_{min}	205	36	9,6	15,6	1	3,93	20,5
MF	16	19,8	P_{nom}	238	56	10,4	6,3	1	2,85	34,4
L1	17	7,3	P_{min}	176	34	10,3	12,9	1	4,40	25,2
L1	18	22,8	P_{nom}	248	82	11,0	3,2	1	5,73	75,6
WW	19	11,4	P_{min}	180	63	15,6	3,5	1	2,53	55,9
B4 – zplyňovací kotel										
MF	20	11,2	P_{min}	143	37	11,4	8,9	1	4,45	60,9
MF	21	27,5	P_{nom}	279	73	7,9	3,8	1	4,08	31,4
L1	22	12,8	P_{min}	139	34	9,8	8,1	1	6,83	74,9
L1	23	25,8	P_{nom}	264	74	9,2	4,0	1	3,92	81,7
B5 – zplyňovací kotel										
WW	24	9,5	P_{min}	114	38	14,8	6,3	1	4,00	79,1
WW	25	19,2	P_{nom}	189	59	13,1	4,3	1	3,73	92,9

Koncentrace O₂ ve spalinách byly během experimentů typicky mezi 10 a 12 %. Ve většině případů byly koncentrace O₂ vyšší při sníženém výkonu, což je typické spíše u spalovacích spotřebičů.

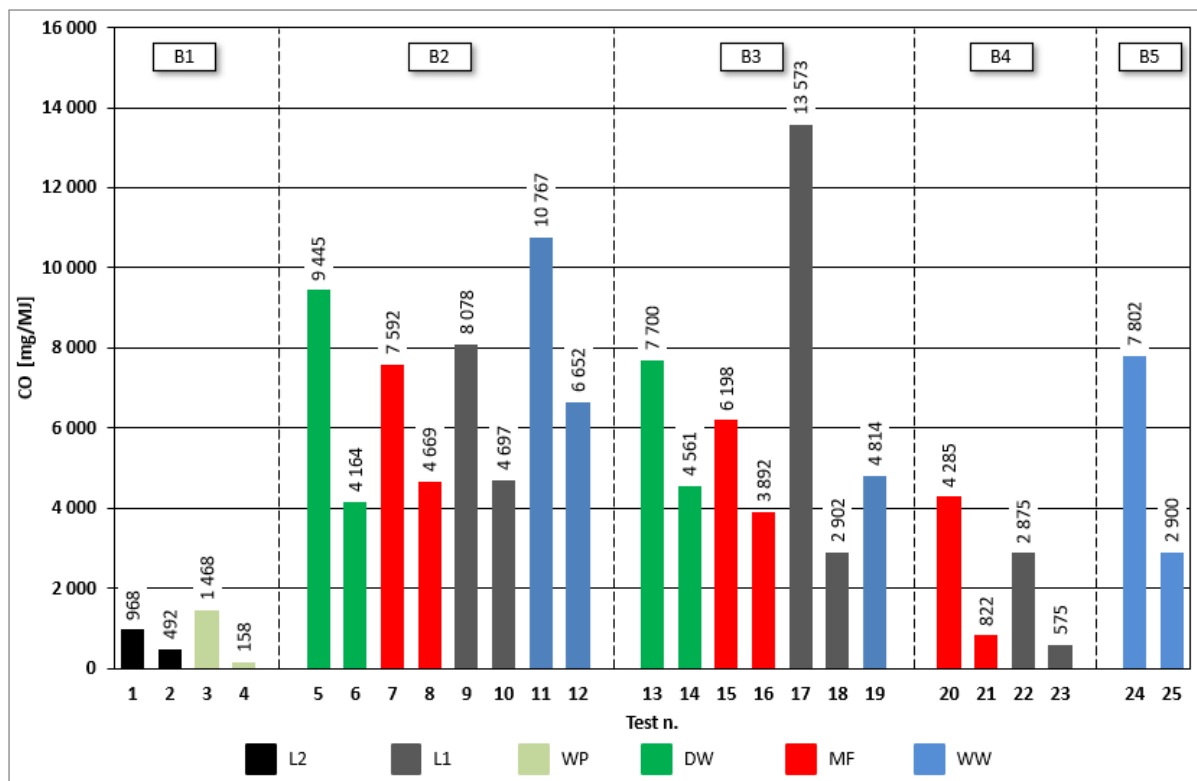
Při spalovacích zkouškách bylo pozorováno, že u některých paliv nebylo možné dosáhnout výkonů blížících se jmenovitému výkonu nebo dokonce sníženému výkonu kotlů. Tyto problémy byly způsobeny zejména tím, že nastavení pro ovládání kotlů s ručním přikládáním paliva do spalovací komory je značně nepřesné. Testy tedy probíhaly na reálně dosažitelných výstupech. Například u B3 s palivem WW nebylo možné dosáhnout výkonu přesahujícího cca 11 kW. V důsledku toho byl test spalování 19 považován za test se sníženým výkonem.

Vzhledem k nízké úrovni ředění nebylo možné pokrýt celou dobu spalování sběrem pomocí DLPI. Zatímco při spalovacích zkouškách byly k dispozici dva impaktory, které byly použity postupně, čištění a opětovné složení impaktoru trvalo přibližně 20–30 minut a předehřátí impaktoru na požadovanou teplotu asi 10 minut. V případě některých testů bylo pokrytí sběru pomocí DLPI nedostatečné, jak naznačují barevná čísla viz. Tabulka 13. Pro účely hodnocení v případech použití samotného DLPI testy, během kterých procento pokrytí přesáhlo 50 % bylo přijato. Pro úsek doby spalování, během kterého byly vyměněny impaktory, byly pro výpočet emisních faktorů (EF) použity průměrné hodnoty naměřené v sousedních hodnotách.

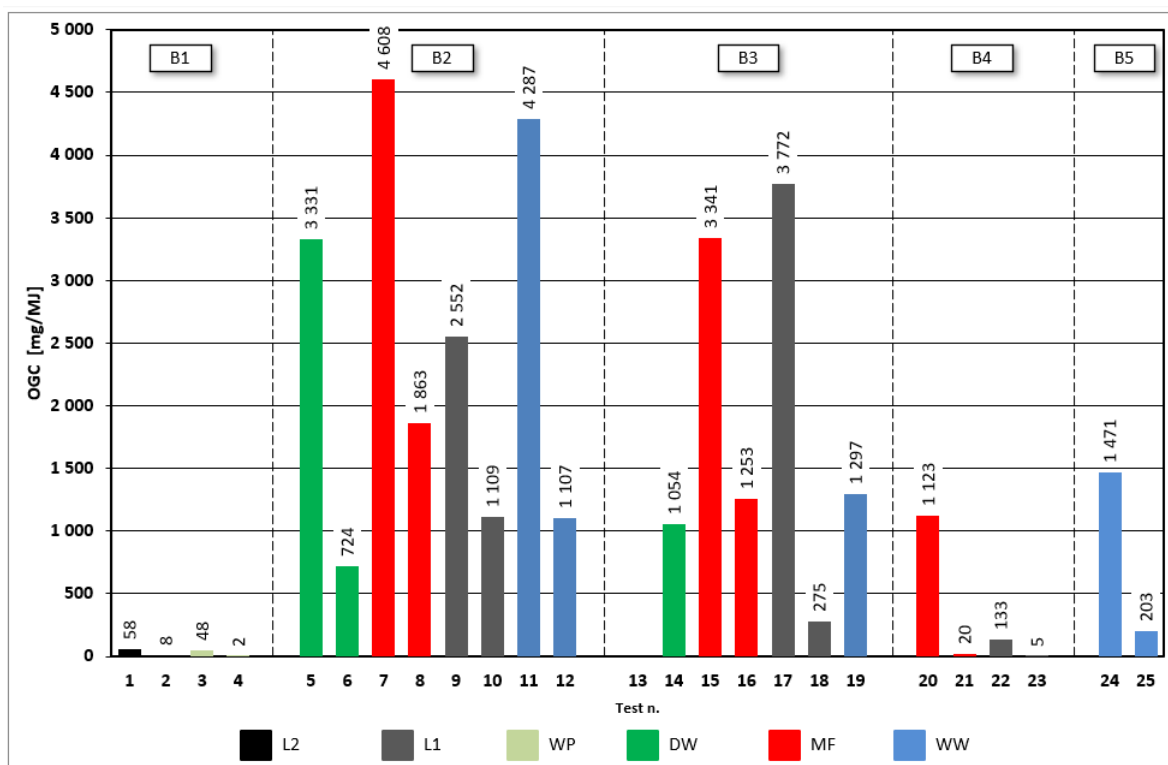
Nejlepších hodnot EF CO bylo dosaženo u kotle B1, který i při provozu na snížený výkon dosahoval hodnot EF na úrovni podobné jako u kotle B4 při provozu na jmenovitý výkon (Graf 10). Globálně nejhorších výsledků bylo dosaženo s kotlem B2. Jeho EF pro CO při jmenovitém výkonu kotle bylo přibližně 4,2–4,7 g/MJ a při sníženém výkonu bylo dosaženo EF přibližně 7,6–9,5 g/MJ (DW, palivo MF, L1). Horších výsledků bylo dosaženo u tohoto kotle s palivem WW (cca 6,7 g/MJ Pnom, 10,8 g/MJ Pmin, testy 11–12). Z pohledu CO nebyl zjištěn žádný rozdíl v typu paliva. Kotel B3 vykázal EF o něco nižší než kotel B2. Jedinou výjimkou byl test 17 (palivo L1, Pmin), při kterém byl EF pro CO 2–3krát vyšší než u ostatních spalovaných paliv. Trend EF pro OGC byl podobný trendu EF pro CO (Graf 11). V případě OGC hodnoty obecně vykazovaly větší rozdíly mezi nominálními a redukovanými výkony. Nejnižší EF dosahoval kotel B1 s maximální hodnotou cca 0,06 g/MJ a emise pouze z B4 se této hodnotě blížily (kromě testu 20). Ostatní kotle vykazovaly hodnoty horší o 1 řád.

Největší emise CO z kotlů B2 a B3 byly způsobeny konkrétně zastaralými konstrukcemi těchto dvou kotlů. U kotle B2 došlo po zavezení k vysušení paliva, spalování těkavých hořlavin a nakonec k následnému spalování pevného uhlíku. To probíhalo prakticky u celého objemu paliva. Většina spalovacího vzduchu byla přiváděna pod rošt a následně prostupovala vrstvou hořícího paliva. V prostoru, kde docházelo ke spalování těkavých hořlavin, byl přívod vzduchu nedostatečný a byl pozorován pokles koncentrace O₂ na úroveň cca 2–3 %. Pro zlepšení spalovacího procesu by bylo nutné změnit poměr primárního/sekundárního spalovacího vzduchu ve prospěch sekundárního spalovacího vzduchu. Při snížených výkonech nebylo dosaženo optimálních teplot ve spalovací komoře z důvodu přebytku spalovacího vzduchu v komoře. Doba, po kterou zplodiny zůstávají v oblasti vysokých teplot, byla u tohoto kotle velmi krátká (B2). Kotel B3 by teoreticky měl vzhledem ke způsobu spalování paliva dosahovat emisních parametrů výrazně lepších než kotel B2. Tento předpoklad se však nepotvrdil. Nejpravděpodobněji to bylo způsobeno rychlým ochlazením spalin ve spalovací komoře, které

byly bezprostředně v kontaktu s povrchem výměníku a neměly tedy dostatek času na oxidaci v horkém prostředí.

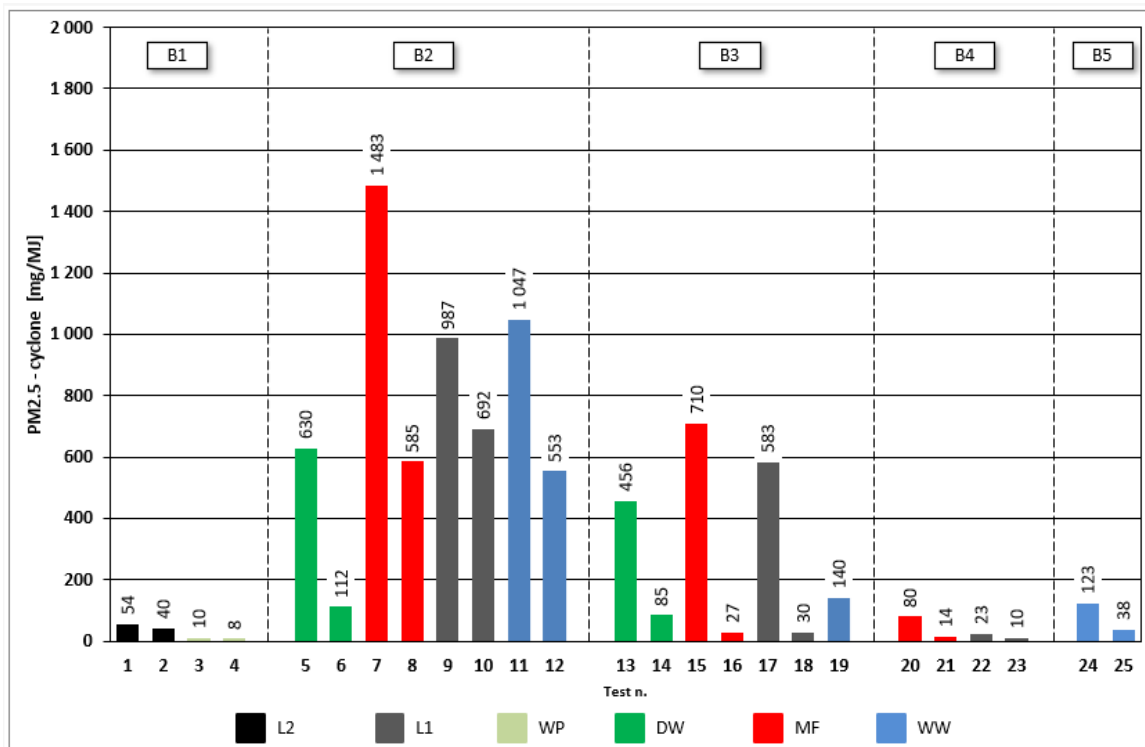


Graf 10 Emisní faktor pro CO



Graf 11 Emisní faktor OGC

Poměrně vysoké hodnoty EF pro CO i OGC byly zjištěny také při spalování paliva WW v kotli B5 (testy 24–25). To bylo způsobeno vlhkostí v palivu; teploty na zplyňovací trysce a ve spalovací komoře nebyly dostatečně vysoké pro oxidaci na konečné produkty spalování. Výsledky ukazují, že plynné emise z MF nejsou tak vysoké, jak se očekávalo; EF pro CO jsou podobné jako u jiných paliv a hodnoty EF pro OGC jsou jen o málo vyšší.



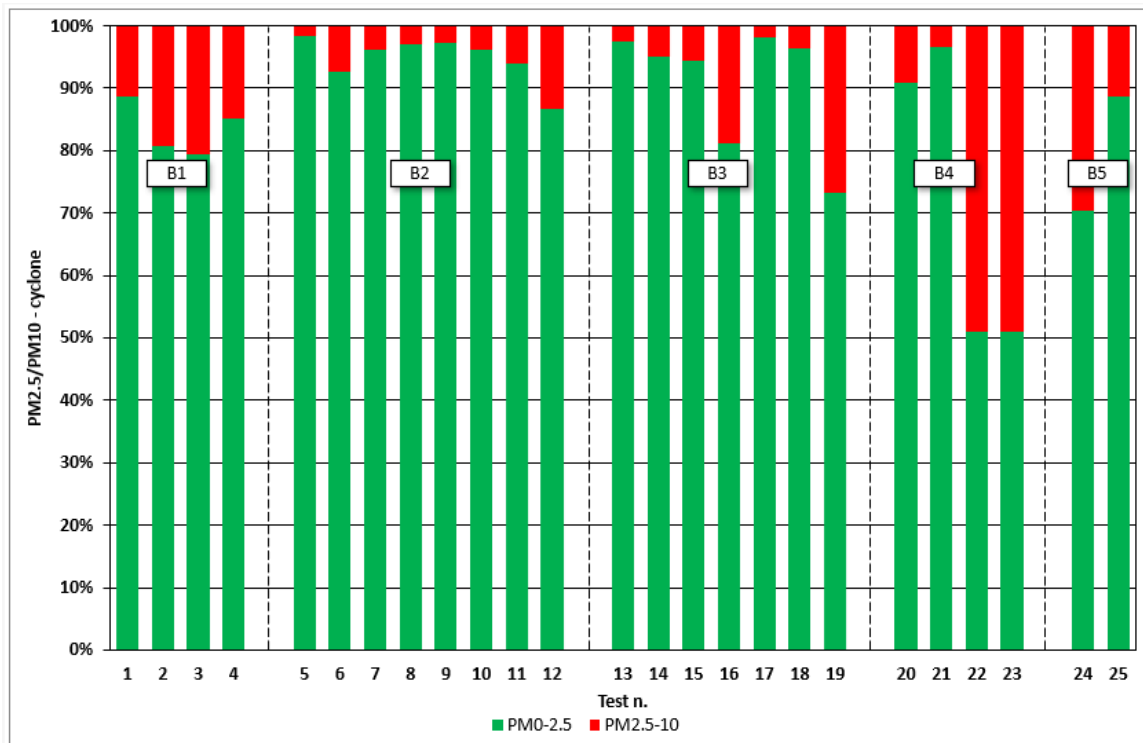
Graf 12 emisní faktor PM_{2,5} měřený na cykloně

Podobně jako u plynných emisí se emise PM mezi testovanými kotli a palivy značně lišily. Typ kotle ovlivňoval emise PM více než použité palivo a kotle s moderní konstrukcí (B1 a B4) produkovaly nejnižší emise PM. Navíc při použití snížených výkonů nevznikly výrazně vyšší emise TZL oproti jmenovitým výkonům, protože automatizace kotlů reguluje přívod paliva a spalovací vzduch podle požadovaného tepelného výkonu. Stejně informace o produkci pevných částic při jmenovitém a sníženém výkonu při spalování dřevěných pelet v moderních kotlích prokázaly i další studie.

Nejvyšší hodnoty EF pro PM_{2,5} byly zjištěny u kotle B2, kde byly emise při jmenovitém výkonu srovnatelné s emisemi z kotle B3 se sníženým výkonem (Graf 12). Bylo to způsobeno především tím, že horká zóna spalovací komory v kotli B2 byla malá a doba zdržení s největší pravděpodobností nebyla dostatečně dlouhá pro správnou oxidaci spalitelných PM, zatímco rozdíly v plynných emisích mezi B2 a B3 nebyly tak jasné. Nejnižší naměřený EF v B2 byl zjištěn při použití paliva DW.

Na rozdíl od B1 a B4 se emise PM značně zvýšily v B2 a B3, když byl použit snížený výkon. V B2 byla naměřená EF PM_{2,5} při sníženém výkonu přibližně 2–5 krát vyšší než EF naměřená při jmenovitém výkonu (přibližně 0,5–1,4 g/MJ (P_{\min} – P_{nom}). Nejpozoruhodnější zvýšení emisí PM při použití sníženého výkonu bylo zjištěno u B3. EF pro PM_{2,5} při sníženém výkonu bylo

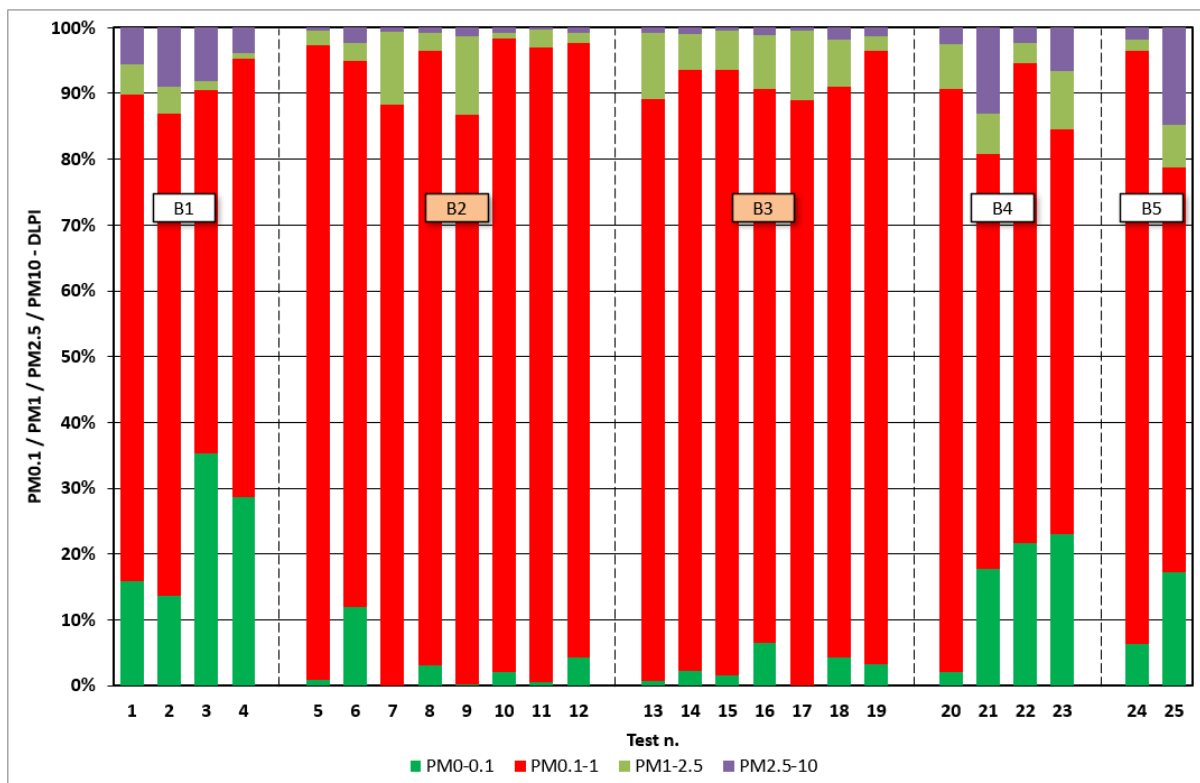
poměrně vysoké, což bylo způsobeno otevřenou klapkou, použitou dle doporučení výrobce, takže spaliny neprocházely celým třítahovým výměníkem.



Graf 13 poměr $PM_{2.5}$ a PM_{10} v cykloně

Z údajů poskytnutých emisemi zachycenými cyklonem bylo zjištěno, že většina PM patří do frakce $PM_{2.5}$ (Graf 13). Většina spalovacích zkoušek prokázala více než 80% podíl $PM_{2.5}$, což je pro kotle typické. Jedinou výjimkou byl B4 s palivem L1, kde podíl $PM_{2.5}$ činil pouze 50 % z celkového objemu PM_{10} při jmenovitém výkonu i při sníženém výkonu.

Porovnání EF pro PM z cyklonu a DLPI uvádí Tabulka 14. Srovnání ukazuje, že EF pro PM_{10} poskytované DLPI je vždy nižší než EF získaný měřením pomocí cyklonu. Minimální rozdíl mezi měřením pomocí DLPI a cyklonu byl 6 % a maximální rozdíl byl 78 %. $PM_{2.5}$ vykazuje stejný trend. Pouze během testu 3 byla naměřena vyšší EF pro DLPI. Výsledky ukazují, že rozdíl nezávisí na celkové koncentraci PM, hmotnosti nasbírané na sběrných substrátech DLPI nebo pokrytí sběrem DLPI za dobu spalování. Vyšší rozdíly byly zjištěny u obou zplynovacích kotlů (B4 a B5). Hodnoty EF pro testy 5–12 (B2), 13–17 (B3) a test 21 nelze porovnávat, protože soubory DLPI nepokryly více než 50 % doby trvání spalovacího období (Tabulka 14). Reprezentativní výsledky těchto testů ukazují měření prováděná pouze za použití cyklonu. Údaje DLPI ukazují, že většinu PM tvoří PM_1 (přibližně 80–90 % PM_{10}) (Graf 14). U kotlů a testů, které vykazovaly nízké hodnoty koncentrací CO a OGC a tedy dobré podmínky spalování, byl zjištěn relativně vysoký obsah $PM_{0.1}$, tj. cca 15–30 % (testy 1–4 a 21–23). U kotlů s horším spalovacím procesem je zjištěný podíl $PM_{0.1}$ pouze 5–10 %.



Graf 14 Zastoupení $PM_{0,1}$; PM_1 ; $PM_{2,5}$ a PM_{10} s DLPI

Tabulka 14 Emisní faktor pro PM_{2,5} a PM₁₀ s cyklonou a DLPI

Palivo	Test č.	Výstup [kW]	P _{nom} / P _{min}	EF PM ₁₀ cyclona [mg/MJ]	EF PM ₁₀ DLPI [mg/MJ]	EF PM _{2,5} cyclona [mg/MJ]	EF PM _{2,5} DLPI [mg/MJ]	dPM ₁₀ [%]	dPM _{2,5} [%]
B1 - automatický kotel									
L2	1	7,6	P _{min}	61	46	54	44	-24	-19
L2	2	23,9	P _{nom}	50	25	40	23	-50	-44
WP	3	7,7	P _{min}	12	12	10	11	-6	9
WP	4	24,8	P _{nom}	10	6	8	6	-39	-31
B2 - prohořivací kotel									
DW	5	8,8	P _{min}	641	535	630	532	-17	-15
DW	6	19,0	P _{nom}	121	75	112	74	-38	-34
MF	7	10,7	P _{min}	1 541	1 269	1 483	1 259	-18	-15
MF	8	23,8	P _{nom}	603	267	585	264	-56	-55
L1	9	9,0	P _{min}	1 014	698	987	689	-31	-30
L1	10	18,8	P _{nom}	720	171	692	169	-76	-76
WW	11	9,0	P _{min}	1 114	801	1 047	799	-28	-24
WW	12	14,1	P _{nom}	638	316	553	314	-50	-43
B3 - odhořivací kotel									
DW	13	7,5	P _{min}	469	652	456	645	39	41
DW	14	15,2	P _{nom}	89	224	85	221	150	161
MF	15	8,4	P _{min}	752	511	710	509	-32	-28
MF	16	19,8	P _{nom}	33	103	27	102	209	276
L1	17	7,3	P _{min}	593	769	583	766	30	31
L1	18	22,8	P _{nom}	31	20	30	19	-36	-34
WW	19	11,4	P _{min}	191	135	140	134	-29	-4
B4 - zplyňovací kotel									
MF	20	11,2	P _{min}	88	52	80	51	-41	-37
MF	21	27,5	P _{nom}	15	13	14	11	-11	-24
L1	22	12,8	P _{min}	46	10	23	10	-78	-58
L1	23	25,8	P _{nom}	21	6	10	6	-70	-44
B5 - zplyňovací kotel									
WW	24	9,5	P _{min}	175	53	123	52	-70	-58
WW	25	19,2	P _{nom}	43	21	38	17	-51	-54

$$dPM_{10} = [(EF PM_{10} DLPI - EF PM_{10} cyclona) / EF PM_{10} cyclona] * 100$$

$$dPM_{2,5} = [(EF PM_{2,5} DLPI - EF PM_{2,5} cyclona) / EF PM_{2,5} cyclona] * 100$$

Shrnutí kapitoly

Celkem bylo spalováno šest různých pevných paliv v pěti typech kotlů na jmenovitý a snížený tepelný výkon. Rozsáhle byly analyzovány emise plynů a částic. Výsledky ukazují, že emise jsou srovnatelné u dřevných paliv, hnědého uhlí a dokonce i u směsného paliva. EF pro CO a ve většině případů i pro OGC závisel především na typu kotle a režimu provozu kotle (snížený nebo jmenovitý výkon). EF pro PM_{2,5} závisel především na typu kotle a režimu provozu kotle. Závislost EF pro CO a PM_{2,5} na typu paliva byla nízká. U automatických kotlů a zplyňovacích kotlů byl rozdíl mezi EF při jmenovitém a sníženém výkonu minimální.

Bylo zjištěno, že více než 80 % všech PM byly částice velikosti PM₁. U kotlů se zlepšeným spalovacím procesem představovala frakce PM_{0,1} přibližně 15–30 % všech PM. U kotlů s horším spalovacím procesem byl podíl nižší (5–10 %), ale celkové emise TZL byly výrazně vyšší. Během experimentů byla pro měření emisí PM použita dvě různá zařízení: cyklon a DLPI. Porovnání výsledků ukazuje, že EF pro PM získaný měřením pomocí DLPI byl nižší než EF získaný pomocí cyklonu.

Pro vytápění domácností by mělo být podporováno používání moderních spotřebičů, protože starší spotřebiče jsou významnými zdroji znečišťujících látek. V ČR je přibližně 88 % všech emitovaných PAU (čtyři PAU: benzo[a]pyren, benzo[b]pyren, benzo[k]pyren, indeno-[1,2,3-cd]pyren) a přibližně 51 % emitovaných PM_{2,5} pochází z malých tepelných spotřebičů [31]. Stejnou situaci lze předpokládat ve všech zemích, kde se k vytápění často používají staré kotle. To zahrnuje většinu zemí východní Evropy.

6. Spalování alternativních paliv

Spalování různých „biopaliv“ je hodnoceno jako vysoce ekologicky přínosný proces. Tyto přínosy však mohou být uplatněny pouze s uznáním úplného vstupu atmosférického CO₂ do recentního spalování biomasy.

Otázka reálného podílu uhlíku z atmosféry (CO₂) a podílu uhlíku z půdy (humus, hnojiva) není až tolik podstatná jako jsou jiné problémy související.

Biomasa dřeva (ale potažmo i z papíru) rostla dlouhé desítky let a nyní je spálena v jediném okamžiku, což znamená zcela malý podíl ročně resorbovaného CO₂ oproti například jednoletým bylinám. Ještě mnohem podstatnějším faktorem pro ocenění skutečných měrných emisí oproti emisím teoretickým jsou však emise vedlejší a nutné pro výrobu daného paliva:

- a) spotřeba energie a emise CO₂ ze sklizně, těžby a zpracování biopaliva (nafta do zemědělských strojů, benzín do pil, drcení surového paliva)
- b) spotřeba energie a emise CO₂ z finální úpravy paliva (sušení, briketování, lisování)



Obrázek 6 Dřevěné pelety

Praktické emise CO₂ z biopaliv jsou v průměru mírně vyšší než z tuhých paliv fosilních, avšak výrazně vyšší než z ropných paliv anebo ze zemního plynu. Reálný výpočet měrných emisí CO₂ je postup nanejvýše komplikovaný a nelze jej vždy a úplně nahrazovat teoretickou emisí CO₂, jak je tabelována dále. Například v této tabulce uvedená měrná emise ze spáleného zemního plynu také není z globálního hlediska hodnotou úplnou a finální, neboť zde není zahrnuta spotřeba zemního plynu pro pohon kompresních stanic po celé trase dodávacího dálkovodu.

V měrné emisi z hnědého uhlí podobně není zahrnuta spotřeba energie na jeho těžbu, drcení a přepravu. Je ale třeba vědět, že úplná náhrada všech fosilních paliv (zemní plyn, ropné produkty, uhlí) pouze různými druhy tzv. „biopaliv“ by znamenala citelné zvýšené zátěže atmosféry okamžitě produkovaným CO₂. Je tomu tak proto, že výhřevnost biopaliv je nižší než u paliv fosilních, především díky výrazně vyššímu obsahu kyslíku v hořlavině. S rostoucím obsahem kyslíku v hořlavině klesá výhřevnost a stoupá emise CO₂. Velmi negativní vliv na rostoucí emise CO₂ má i vlhkost biopaliv. S rostoucí vlhkostí strmě klesá výhřevnost a rychle roste emise CO₂, neboť významný podíl energie se spotřebovává na vysoušení paliva.

6.1 Měrná emise CO₂ při spalování různých paliv

V tomto porovnání nezahrnuje měrná emise vlivy účinností odlišných spalovacích zařízení pro různá paliva ani vlivy vedlejších energetických spotřeb. Reálné měrné emise se mohou podstatně lišit podle změn vlhkostí paliva (s rostoucí vlhkostí měrná emise CO₂ strmě stoupá tak, jak klesá výhřevnost paliva).

Tabulka 15 Měrné emise CO₂ vybraných tradičních a alternativních paliv

	Vlhkost paliva	Měrná emise teoretická
	W' [% hm.]	g CO ₂ /MJ (výhřevnosti)
Plynná paliva		
Zemní plyn	0	54,90
Bioplyn (58 % CH ₄)	0	95,08
Dřevo a výrobky z něj		
Dřevěné brikety	5,64 – 7,85	98,71 – 104,88
Dřevěné pelety	8,98	95,67
Dřevní štěpka	18,28	98,90
Dřevní piliny	6,29	100,34
Odpadní dřevo	56,56	113,67
Lesní štěpka	51,07	112,11
Papír a výrobky z něj		
Celulóza čistá	0	108,00
Papírové brikety	5,67	103,88
Papírové pelety	1,87	101,54
Papírové brikety PC	5,72	102,00
Odpadní papír	5,18	109,74
Biomasa a přírodní produkty		
Pelety z trav	9,68	90,91
Pšeničné otruby	11,80	97,15
Pelety z rostlinného odpadu	10,96	99,54
Fermentační zbytek z AD	11,42	100,28
Kompost	27,96	105,37
Lihovarské výpalky	7,20	97,32

6.2 Barva dřevěných briket a jejich kvalitativní vlastnosti

Barva briket nemusí být vždy přímým indikátorem kvality. I brikety ze světlých dřev (např. smrkové) mohou být tmavé, pokud jsou užity velmi vysoké lisovací tlaky, za nichž dochází k ohřevu materiálu až na teploty počínající karbonizace (250–300 °C i více) a vzniklé dehty zbarvují materiál (zvláště povrch brikety) do tmavohnědých až černých odstínů.

Takovéto brikety mohou být z hledisek spalování velmi kvalitní. Často ale jsou brikety tmavě zbarvené od příměsí kůry (někdy je dokonce výrobce označuje jako „kůrové“) a tyto brikety se liší od briket světlých většinou vyšším obsahem popela. U světlých briket je většinou dosahováno obsahů popela do 1,5 % hm. Vyšší obsahy popela jsou často u tzv. „kůrových“ briket vyšší (např. i přes 3 % hm.). To znamená, že i při shodném spalném teple hořlaviny dřeva je jejich výhřevnost nižší než u briket světlých. Světlé brikety z jehličnatých dřev většinou bez problémů splní požadovaný rozsah výhřevnosti 17,5 – 19,5 MJ/kg sušiny. Reklamním trikem je sice oprávněné tvrzení, že tmavé brikety vydrží déle žhavé, většinou ale mají celkovou výhřevnost o něco nižší než brikety světlé.

V zásadě není doporučitelné nakupovat dřevěné brikety podle ceny s domněnkou, že čím jsou dražší, tím lepší kvalitu získáme.

Dřevěné brikety by v každém případě měly obsahovat certifikované a výrobcem minimálně zaručené základní parametry:

- vlhkost W_t^r [% hm.] (max. 12 % hm.)
- obsah popela (v bezvodém stavu) A^d [% hm] (max. 1,5 % hm.)
- výhřevnost (v bezvodém stavu) Q_i^d [MJ/kg] (17,5 – 19,5 MJ/kg)
- obsah síry (v bezvodém stavu) S_t^d [% hm.] (max. 0,08 % hm)
- obsah chloru (v bezvodém stavu) Cl_t^d [mg/kg] (max. 300 mg/kg)

Důležitými dodatkovými parametry pro dřevní výlisky (brikety i pelety) jsou otlukové zkoušky prováděné podle národních anebo evropských norem. Za vyhovující se považují výlisky mající otluk (otěr) do 2,3 %. V ČR platné evropské normy hodnotí tzv. trvanlivost, což je ale identický parametr v jiném vyjádření

- trvanlivost [%] = 100 – otluk [%]

Obecně lze ale použití dřevních výlisků (ať již to jsou brikety anebo pelety) pro vytápění domácnosti doporučit, a to minimálně z toho důvodu, že při nedokonalém spalování dřeva nevzniká tak vysoký podíl dehtů s obsahem PAU jako při spalování uhlí.

Spalování jakýchkoliv odpadů nebiologického původu (plasty, pryž) anebo čistírenských kalů je otázkou zcela mimo úvahy o emisích z biopaliv. Tyto materiály smějí být spalovány pouze na specializovaných zařízeních s vysoce účinným čištěním spalin a s trvalým dozorem nad kvalitou emitovaných spalin.

6.3 Spalování netradičních paliv

V dnešní době se stále častěji setkáváme s poptávkou po ekonomicky dostupnějším palivu. V době, kdy v Evropě roste cena kvalitní dřevní hmoty, je vhodné uvažovat o spalování méně hodnotného paliva při zachování únosného zvýšení emisí znečišťujících látek. Vzhledem k rozsáhlým územím v obcích, které představují zalesněné plochy (parky, zahrady škol, apod.), je žádoucí zjistit, za jakých podmínek a při jaké úpravě může být k energetickému spalování vhodné spadané listí, které se běžně hlavně kompostuje. Jednou z možností, jak takovýto materiál energeticky využít, je spalování v lokálních topeništích jako cenově dostupné palivo. Možnost energetického využití tohoto materiálu závisí především na výhřevnosti materiálu, která je zásadním způsobem ovlivněna vlhkostí. Obsah C, H, O, N, S a složení popeloviny se jeví jako druhotný parametr [20]. Zákon č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů definuje biomasu jako biologicky rozložitelnou část produktů, odpadů a zbytků biologického původu z provozování zemědělství a hospodaření v lesích a souvisejících průmyslových odvětvích, zemědělské produkty pěstované pro energetické účely a biologicky rozložitelnou část průmyslového a komunálního odpadu.

V tomto případě nejde pouze o to, jestli se potenciální alternativní palivo dá nebo nedá spálit. Za vhodných podmínek se dá spálit jakýkoliv materiál obsahující dostatečné množství hořlavé složky [21].

Nezodpovědné a laické provozování spalovacích zařízení může mít i v případě spalování biomasy za následek výrazné překročení emisních limitů pro některé škodliviny [22]. Vývin emisí a kontaminace ovzduší prachovými částicemi je problém jak pro zdraví, tak pro životní prostředí. Ukazuje se, že menší částice jsou nebezpečnější než stejná hmotnost částic větších, neboť jejich působení může být spojeno s jejich počtem a s aktivním povrchem, které jsou u malých částic mnohem větší než u částic velkých. Jemnější částice také setrvávají ve vzduchu delší dobu než větší částice. Na povrchu částic se také zachytávají nebezpečné škodliviny (např. semivolatilní organické polutanty nebo těžké kovy – As, Cd, Zn, Cu a další) [23].

Roční bilance emisí ukazují, že podíl malých zdrojů na celkovém znečištění ovzduší (polyaromatické uhlovodíky PAU, tuhé znečišťující látky TZL) je výrazný. Zpracované studie dokládají až poloviční podíl malých zdrojů v případě polyaromatických uhlovodíků a cca třetinový v případě tuhých částic. Emisní bilance většiny evropských států ukazují, že více než třetina dioxinů a furanů emitovaných do ovzduší pochází z malých zdrojů [24]. Proto je nezbytné se zamyslet nad možností spalování městské odpadní biomasy – konkrétně využití spadaného listí pro spalování v malých spalovacích zařízeních a množstvím emisí znečišťujících látek, které je uvolňováno při takovém spalování.

Stanovené parametry paliva

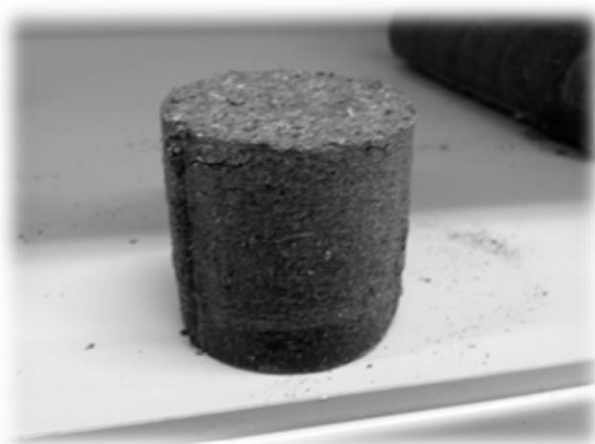
V palivu byl termickou analýzou stanoven obsah vody (W^r), popela (A^r), hořlaviny (h^r) a prchavé hořlaviny (V^{daf}). Termická analýza byla provedena na přístroji STA Jupiter F1 firmy NETZSCH v teplotním intervalu 25 až 1200 °C, rychlosti ohřevu 10 °C/min a průtoku kyslíku 20 ml/min s navážkou vzorku cca 2 g.

Kalorimetricky bylo stanoveno spalné teplo, z něhož byla pak dopočítána výhřevnost. Elementární stanovení obsahu C, H, S, N a O (prvkový rozbor) bylo provedeno akreditovanou laboratoří a dále přepočteno na hořlavinu v suchém stavu h^d (viz Tabulka 16). Na základě těchto informací byly dopočítány parametry spalování.

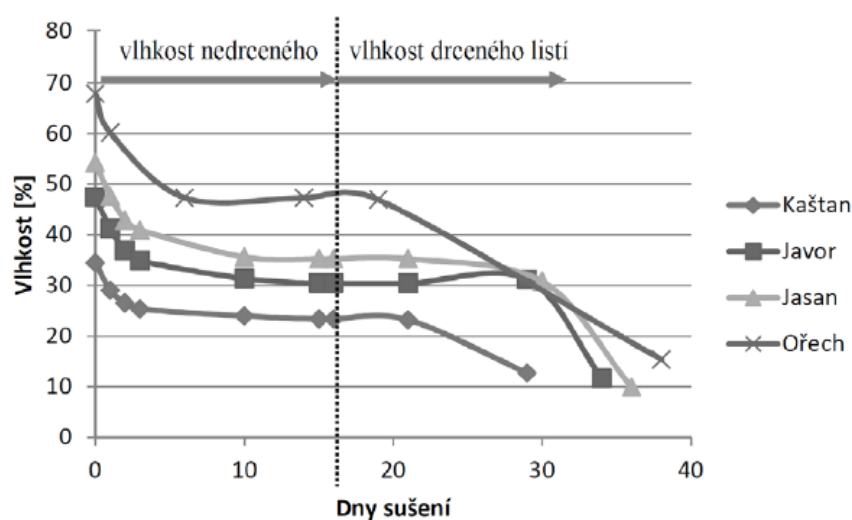
Aby byla stanovena popelovina pouze z listí a vyloučil se příspěvek popeloviny z prachu a nečistot, který by mohl tvořit popelovinu po spálení, byly analyzovány rovněž celé čisté listy. Tímto měřením bylo potvrzeno, že nečistoty nijak výrazně neovlivnily množství popeloviny.

Tabulka 16 Spalné teplo, výhřevnost, obsah popela a prchavé hořlaviny vysušených vzorků

Typ	Spalné teplo [MJ kg ⁻¹]	Výhřevnost [MJ kg ⁻¹]	W ^r [%]	A ^r [%]	V ^{daf} [%]	S ^d [%]	C ^d [%]	H ^d [%]	N ^d [%]	O ^d [%]
Ořech	16,0	14,6	12,9	11,4	77,4	0,1	46,4	5,4	1,4	33,8
Kaštan	15,7	14,5	12,9	12,7	73,5	0,1	45,8	5,1	1,0	33,4
Jasan	12,7	11,3	23,0	18,8	79,0	0,4	41,2	4,9	1,1	28,0
Javor	15,0	13,8	10,5	18,2	76,6	0,2	42,4	4,8	0,8	31,5



Obrázek 7 Ukázka briket ze vzorku listí kaštan



Graf 15 Křivka sušení vzorku

Pro spalování briket vyrobených z lisovaného listí bylo použito těchto typů spalovacích zařízení:

Krbová kamna Romotop KK112D/AKU

Pro první spalovací zkoušky byla zvolena bezroštová krbová kamna Romotop KK112D/AKU. Krbová kamna (dále také KK) jsou konstruována pro spalování kusového paliva (primárně dřeva) v periodických dávkách a jsou určena k vytápění prostoru, v němž jsou umístěna.

Krbová kamna Storch Estelli Keramik

Po prvotních zkušenostech s přívodem vzduchu do spalovací komory byla spalovací zkouška provedena v roštových krbových kamnech Storch Estelli Keramik. Pro vytvoření základní vrstvy bylo použito bukové dřevo. Krbová kamna jsou způsobilá krátkodobého provozu a doporučeným palivem je dřevo. Spotřebič je vybaven centrálním přívodem spalovacího vzduchu. Spalovací komora je vybavena otočným roštem.

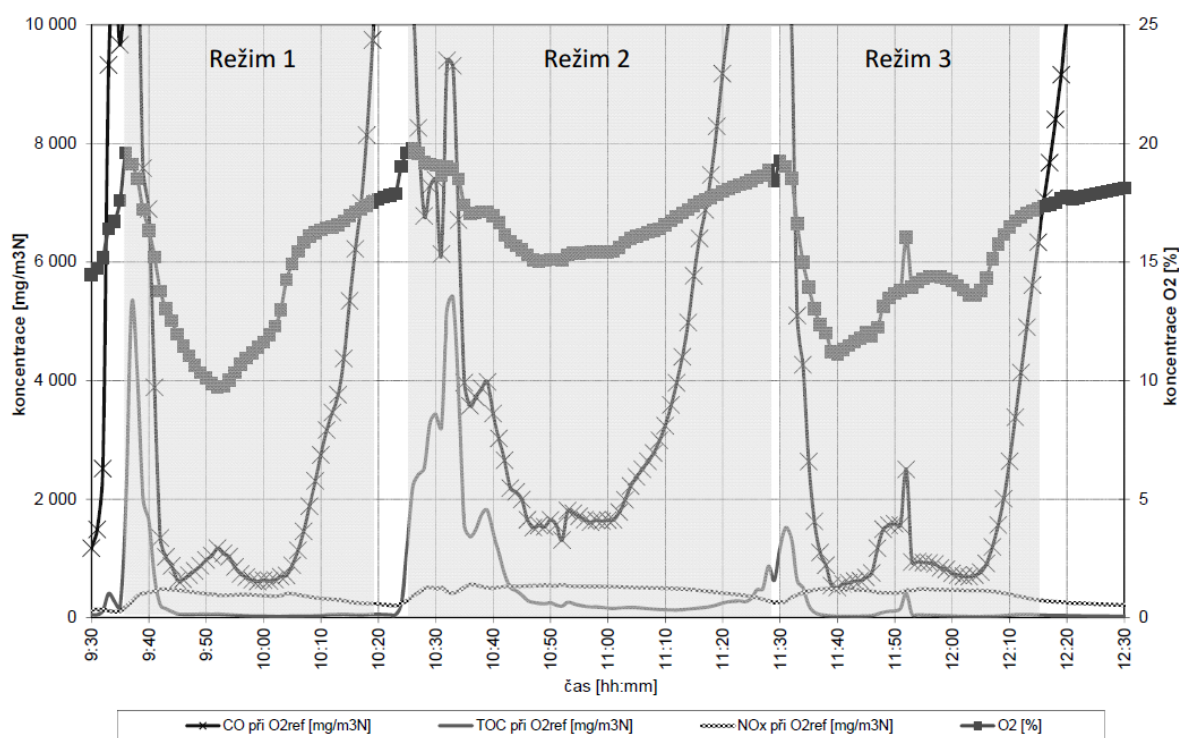
Tabulka 17 Výsledky spalovacích zkoušek v krbových kamnech Romotop KK 112D/AKU

Číslo režimu		1	2	3	
Čas počátku měření	h:min	9:36	10:25	11:30	
Čas konce měření	h:min	10:19	11:28	12:15	
Délka zkoušky	h	0,7	1,1	0,8	
Atmosférický tlak	mbar	967	967	966	
Teplota vzduchu	°C	19,0	19,1	19,2	
Relativní vlhkost vzduchu	%	34,9	34,9	34,9	
Označení kamen		Romotop KK112D/AKU			
Palivo		Jasan			
Účinnost zařízení (nepřímá metoda)	%	69,0	55,4	70,1	
Ztráta citelným teplem spalin	%	27,7	39,7	26,7	
Ztráta plynným nedopalem	%	1,3	2,9	1,2	
Ztráta sdílením tepla do okolí	%	1,5	1,5	1,5	
Ztráta mechanickým nedopalem	%	0,5	0,5	0,5	
Teplota spalin	°C	250	215	228	
Koncentrace O ₂ v suchých spalinách	% _{obj.}	13,9	16,9	14,3	
Přebytek vzduchu	–	2,96	5,14	3,13	
Koncentrace plynných emisí v suchých spalinách při referenčním kyslíku 13 %	CO	mg m ⁻³ _N	1 834	3 869	1 566
	NO _x	mg m ⁻³ _N	388	502	448
	TOC	mg m ⁻³ _N	185	599	98
	CO ₂	g m ⁻³ _N	143	136	141
Měrné emise	CO	mg MJ ⁻¹	1 335	2 815	1 139
	NO _x	mg MJ ⁻¹	282	365	326
	TOC	mg MJ ⁻¹	135	436	71
	CO ₂	g MJ ⁻¹	104	99	102

Pozn.: Výsledná koncentrace emisí NO_x je přepočtena na NO₂



Obrázek 8 Brikety staženy drátem v krbových kamnech Romotop KK112D/AKU



Graf 16 Průběh emisí CO, TOC, NOx při $O_{2ref} = 13\%$ a koncentrace O_2 ve spalninách při spalovacích zkouškách na krbových kamnech Romotop KK112D/AKU

Spalovací zkoušky na krbových kamnech Storch Estelli Keramik

Zkoušky probíhaly ve třech různých režimech. V režimu 1, kdy přívod spalovacího vzduchu byl uzavřen (regulační klapka na 0 %), měly brikety na vhodně připravené základní vrstvě dobrý zápal. Brikety hořely viditelně lépe, než při všech předchozích zkouškách (na krbových kamnech Romotop). Vzduch se dostával k briketám zespod.

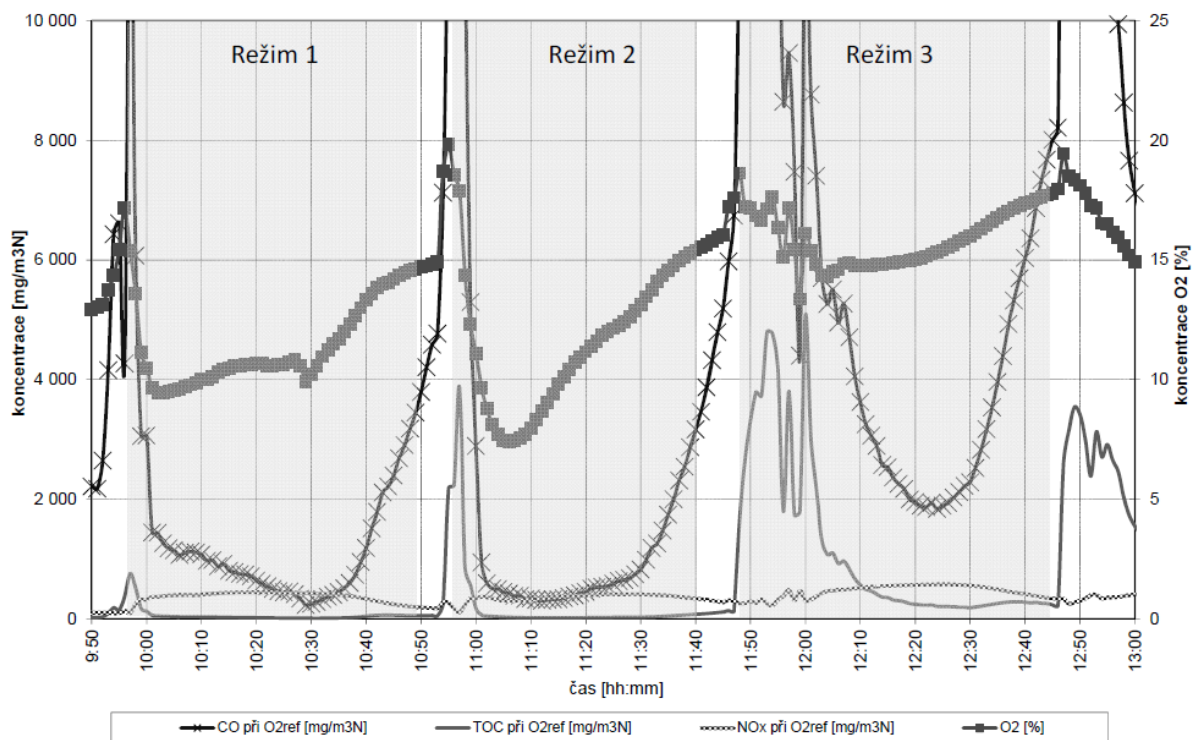
V režimu 2, kdy spalovací vzduch byl nastaven na 0 %, bylo před přiložením krátce proroškováno a přívod vzduchu otevřen na 100 %, poté vzduch nastaven na 0 %.

V režimu 3, kdy přívod vzduchu po celou dobu byl otevřen na 25 %, byl rošt již zanesen popelem a zápal byl špatný. Nejlepších výsledků ze všech spalovacích zkoušek na roštových kamnech bylo dosaženo při režimu 1 (tab. IV a obr. 6 – režim 1).

Tabulka 18 Výsledky spalovacích zkoušek v krbových kamnech Storch Estelli Keramik

Číslo režimu		1	2	3	
Čas počátku měření	h:min	9:56	10:55	11:48	
Čas konce měření	h:min	10:49	11:40	12:44	
Délka zkoušky	h	0,9	0,8	0,9	
Atmosférický tlak	mbar	978	978	978	
Teplota vzduchu	°C	19,1	19,1	19,1	
Relativní vlhkost vzduchu	%	38,3	38,3	38,3	
Označení kamen		Storch Estelli Keramik			
Palivo		Ořech			
Účinnost zařízení (nepřímá metoda)	%	77,5	77,5	63,6	
Ztráta citelným teplem spalin	%	19,7	19,7	31,0	
Ztráta plynným nedopalem	%	0,9	0,9	3,4	
Ztráta sdílením tepla do okolí	%	1,5	1,5	1,5	
Ztráta mechanickým nedopalem	%	0,5	0,5	0,5	
Teplota spalin	°C	255	252	232	
Koncentrace O ₂ v suchých spalinách	% _{obj.}	11,4	11,7	15,8	
Přebytek vzduchu	–	2,20	2,25	4,06	
Koncentrace plynných emisí v suchých spalinách při referenčním kyslíku 13 %	CO	mg m ⁻³ _N	1 264	1 299	5 024
	NO _x	mg m ⁻³ _N	385	357	475
	TOC	mg m ⁻³ _N	52	103	1 072
	CO ₂	g m ⁻³ _N	145	146	139
Měrné emise	CO	mg MJ ⁻¹	842	865	3 346
	NO _x	mg MJ ⁻¹	256	238	316
	TOC	mg MJ ⁻¹	34	69	714
	CO ₂	g MJ ⁻¹	97	97	92

Pozn.: Výsledná koncentrace emisí NO_x je přepočtena na NO₂



Graf 17 Průběh emisí CO, TOC, NO_x při O_{2ref} = 13% a koncentrace O₂ ve spalínách při spalovacích zkouškách v krbových kamnech Storch Estelli Keramik

Tabulka 19 Emisní faktor jednotlivých frakcí

Typ	Emisní faktor [mg kg _{pal} ⁻¹]				Doba odběru [min]
	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM ₁	Nano - PM _{0,1}	
Ořech	986	943	915	51	35
Kaštan	420	408	403	67	52
Jasan	1256	1242	1205	248	36
Javor	1147	1134	1102	86	43

Shrnutí kapitoly

Experimentálně bylo ověřeno, že je možné spadané listí upravit do podoby brikety a následně spálit v krbových kamnech. Základním parametrem pro možnost briketování listí je jeho vlhkost a granulometrie. Experimenty ukázaly jako optimální drcení listí na frakci 12–20 mm a sušení na vlhkost 11–14 hm. %.

Vyrobené brikety dobře držely tvar a nerozpadaly se. Z vlastností materiálu vyplývá, že je v briketách obecně hodně popeloviny, což představuje potenciální problém po vyhoření a rozpadu, jelikož může dojít k ucpání přívodů primárního vzduchu.

Výsledkem dosavadních zkoušek na standardních typech spalovacích zařízení, jakými jsou výše zmíněná krbová kamna, je fakt, že brikety z listí se spalovat dají, pokud je zajištěn dostatečný přívod spalovacího vzduchu. Brikety v případě rovnoměrného přívodu vzduchu mezi palivo hoří dobře a kamna i s tímto palivem dosáhla dobrých výsledků ve vztahu k emisním limitům pro tento typ zařízení. Vůbec nejlepších výsledků bylo dosaženo při prvním zápalu u roštových

kamen Storch Estelli Keramik. Tyto výsledky se prakticky dají srovnávat i se spalováním suchého dřeva.

Vzhledem k velkému množství popeloviny v materiálu a špatné soudržnosti vyhořelých briket docházelo k ucpávání roštu (přívodu spalovacího vzduchu) již po první nebo druhé spalovací zkoušce. Z tohoto důvodu je třeba najít vhodný typ spalovací komory, který bude odolnější proti zanesení popelem (tuhý nedopal). Jako nejvhodnější se pro tento typ paliva jeví kamna nebo kotel založený na odhořívacím nebo zplyňovacím principu.

6.4 Spalování bukového listí v domácnostech

Navzdory rostoucímu hledání moderních a téměř bezobslužných způsobů (např. pomocí tepelných čerpadel) vytápění v celé Evropské unii (EU) je obliba vytápění spalováním biomasy stále značné. Spalovací jednotky na biomasu pro vytápění domácností jsou oblíbené, rozšířené a důležité pro dosažení evropských cílů podílu obnovitelné energie. Dnes v Evropě je více než 70 milionů spotřebičů na tuhá paliva pro vytápění domácností. Jen v České republice je asi 500 tisíc domů, které jsou vytápěny topením spalujícím tuhá paliva. Tato čísla zahrnují všechny druhy spotřebičů na biomasu a uhlí. Podíl spalování uhlí v domácnostech klesá z mnoha známých důvodů, hlavním důvodem je, že se jedná o fosilní palivo s relativně vysokým obsahem síry a rtuti, ale na druhou stranu spotřeba biomasy pro vytápění domácností v EU stále roste.

Výše uvedené skutečnosti vybízejí k hledání alternativních zdrojů vhodných (odpadních) biomas pro výrobu briket a pelet. Z energetického hlediska sesbírané padlé listí z městské zeleně je považováno za relativně homogenní biomasu, vhodnou pro další použití, např. briketování a peletování.

Pro účely experimentů bylo sesbíráno přibližně 70 kg bukového listí. Listy byly ručně provzdušňovány a podíl vody v listech byl měřen každých několik dní. Listy byly uloženy na plachtě ve vrstvě přibližně 10 cm. Průběh změn hmotnostního podílu vody v listech během prvního měsíce sušení uvádí Tabulka 20.

Tabulka 20 Proces změn vodní frakce v listech před drcením

Dny po sběru	Hmotnostní podíl vody v listech (%)	Dny po sběru	Hmotnostní podíl vody v listech (%)
0	66,9	9	41,1
2	58,8	10	40,4
3	50,3	16	36,4
7	43,9	22	30,6
8	42,5	27	27,1

Po 27 dnech sušení byly listy rozdrceny. K tomuto procesu byl použit kladivový drtič. Na výstupu z drtiče bylo umístěno síto s otvorem síta 20 mm. Rozměr síta byl zvolen podle dosavadních zkušeností s tímto materiálem. Po vysušení došlo k drcení, protože listy s vysokým podílem vody ucpaly síto, což bylo stanoveno experimentálně. Rozdrcené listy byly

skladovány na stejném místě jako dříve po dobu dvou týdnů po sušení. Konečný hmotnostní podíl vody v listech byl 14,8 % před briketováním. Důvodem dosušení byl doporučený hmotnostní podíl vody v materiálu dle výrobce briketovacího stroje.

Pro briketování bylo použito lisovací zařízení Dinamic 70N. Toto zařízení bylo původně navrženo pro briketování zbytků dřeva (zejména pilin). Finálním produktem zařízení jsou válce o průměru 55 mm. Délka briket je různá podle druhu zpracovávaného materiálu. Příklad finální brikety z bukových listů znázorňuje Obrázek 9.



Obrázek 9 Briketa z bukového listí

Při lisování se materiál lisováním mírně zahřál a tím částečně vysušil. Stroj pracoval s popsáním materiálem bez problémů a nedocházelo k zanášení. Vyráběné brikety mají variabilní délku, od 2 do 20 cm. Při manipulaci s nimi nedošlo k žádnému výraznému drolení.

Pro spalovací testy byla zvolena dvě paliva. První z nich byly brikety z bukových listů. Druhým použitým palivem byly standardní dřevěné brikety (s certifikací ÖNORM, bez kůry) vyrobené pouze z čistých hoblin suchého smrku. Výsledky přibližných a konečných analýz uvádí Tabulka 21.

Tabulka 21 Výsledky přibližných a konečných analýz listů buku v různých stavech.

Prvek	Jednotky	Surový stav	Před briketováním	Po briketování	Standardní briketa s ÖNORM certifikací
Uhlík (C)	%	15,93	39,80	42,56	46,43
Vodík (H)	%	1,73	4,32	4,62	5,66
Dusík (N)	%	0,27	0,68	0,73	0,3
Kyslík (O)	%	11,33	28,29	30,25	38,09
Síra (S)	%	0,03	0,08	0,09	0
Voda (W)	%	65,88	14,77	8,87	9,21
Popel (A)	%	4,32	12,05	12,88	0,31
Výhřevnost (Q _i)	MJ/kg	4,32	14,47	15,64	17,03

Z tabulky je zřejmý vysoký podíl vody v den sběru listů. Rovněž je zřejmý vysoký podíl popela v briketách. Pro srovnání, v analyzovaných standardních dřevěných briketách je přibližně 43x méně popela než v briketách z bukových listů. Mezi další rozdíly patří nižší hmotnostní podíly kyslíku, uhlíku a vodíku a vyšší hmotnostní podíl dusíku a síry v briketách z bukových listů. Z hlediska výhřevnosti mají brikety z bukového listů přibližně o 8 % méně energie na kilogram než standardní dřevěné brikety.

Biomasa se skládá ze tří hlavních složek, kterými jsou: celulóza, hemicelulóza a lignin se stopami minerálů a extraktivních látek [43]. Obecně se hmotnostní podíly celulózy, hemicelulózy a ligninu v biomase pohybují v rozmezí 20–35 % hm., 40–45 % hm. a 15–30 % hm. [44]. Podíl těchto složek závisí na druhu biomasy. Různé teplotní rozsahy jejich rozkladu podle různých typů biomasy, stejně jako rychlost ohřevu (°C/min) a průtok plynu (ml/min) shrnuje Tabulka 22 za podmínek TG, kde RT znamená pokojovou teplotu.

Tabulka 22 Teplotní rozsahy tepelného rozkladu hemicelulózy, celulózy a ligninu

Hemicelulóza [°C]	Celulóza [°C]	Lignin [°C]	Druh biomasy	TG podmínky	Zdroj
180-258	250-360	350-600	Prosopis juliflora	30-600°C; 2,5,10, 15, 20,25°C/min; 60 ml/min Ar; izoterma 105°C po 20 min (pro odvod vlhkosti)	[46]
250-400 ^a	250-400 ^a	400-700	Borové dřevo	RT - 1000°C; 10,20, 30,40°C/min; 60ml/min N ₂ , isoterma 1000°C v toku 5 ml/min za přístupu O ₂	[47]
300-400 ^a	300-400 ^a	400-520	Listy Platonu východního	30-700; 10°C, 50 ml/min vzduch (N ₂ 79%, O ₂ 21%)	[48]
172-466 ^a	172-466 ^a	466-792	Listy Přesličníku	RT-800°C; 10°C/min; 100 ml/min N ₂	[45]
180-360	360-500	500-700	Listy z olivovníku	30-1000°C; 10°C/min; 60ml/min vzduchu	[50]

^a TG píky hemicelulózy a celulózy se v této pyrolýzní zóně překrývají.

Termochemické metody zahrnují pyrolýzu, zplyňování, zkapalňování, torefikaci a spalování. Jak uvádí Parathasarathy a Narayanan [45], tepelný rozklad biomasy v inertní atmosféře lze rozdělit do tří zón: zóna I se týká vývoje vlhkosti, zóna II se týká degradace složek hemicelulózy a celulózy a zóna III odpovídá rozkladu ligninu a anorganických látek.

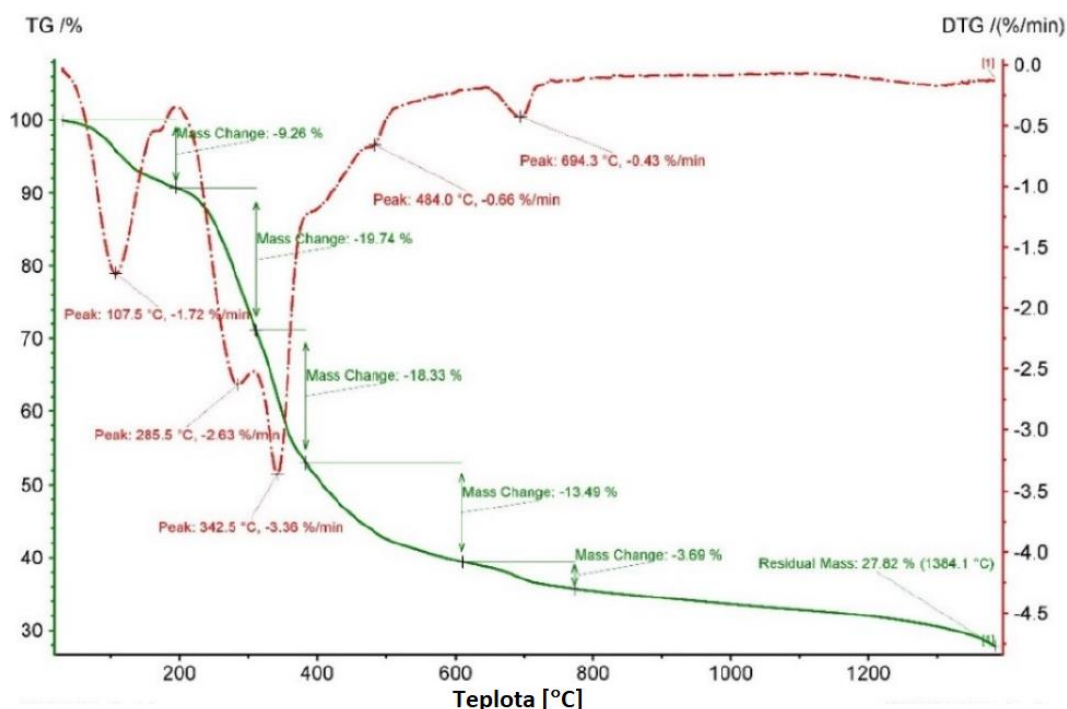
Teplota odvodu vlhkosti závisí na druhu biomasy a množství vlhkosti. Nad teplotou 200 °C dochází k tepelnému rozkladu organických složek (štěpení glykosidových vazeb). Hemicelulóza je první polysacharid, který se rozkládá. Protože hemicelulóza a celulóza často degradují ve velmi blízkém teplotním rozmezí, jejich degradační zóny se často vzájemně překrývají [45].

Při teplotách nad 400 °C se proces pyrolýzy urychlí a vytvoří pevný zbytek (dřevěné uhlí) a obsah těkavých látek se poměrně dramaticky sníží. Zóna, po které již nedochází k dalšímu úbytku hmotnosti, se nazývá pasivní zóna, tj. nad těmito teplotami nedochází k odstranění

těkavých látek, přesto se tvoří uhlík a popel jako konečný pevný zbytek [46][51]. Třetí stupeň (600–800 °C) je rovněž určen k odstraňování a reakci anorganické hmoty a nad 800 °C dochází k přeměně zbytkové anorganické hmoty [52].

Spalovací testy byly provedeny za účelem zjištění chování briket z bukových listů při jejich skutečném spalování v malých kamnech. Jako spalovací jednotka byla zvolena kamna Storch ESTELLI KERAMIK. Jedná se o křbová kamna původně určená pro spalování polen. Tato kamna jsou navržena bez výměníku nebo nuceného proudění vzduchu ventilátorem. Teplo je odváděno pouze stěnami zařízení a stěnou spalinového kanálu do okolí zařízení. Spaliny procházejí spalovací komorou (s otočným roštem) a dále do spalinové cesty. Tato kamna byla vybrána pro snadnou obsluhu a velmi dobře regulovatelný přívod spalovacího vzduchu. Předpokládaný tepelný výkon je 7 kW. Zapálení bylo provedeno bukovým polenem. Po vytvoření žhavé základní vrstvy uhlíků byla přidána první várka briket z bukových listů. Během spalovacího testu bylo použito celkem sedm šarží briket z bukových listů.

Termogravimetrická analýza briket z bukového listí byla provedena na přístroji STA441 F1 Jupiter (Netzsch). Počáteční hmotnost vzorku bukových listů byla 52,3 mg. Rychlost zahřívání byla 10 °C/min z RT na 1500 °C ve 100 ml/min N₂. Průběh tepelného rozkladu bukových listů znázorňuje Graf 14.



Graf 18 Průběh tepelného rozkladu bukového listí

Naměřené hodnoty teplot rozkladu jednotlivých bukových listových briket ve srovnání s hodnotami uvedenými v literatuře jsou uvedeny níže.

- Zóna I: teplotní rozsah 30–195°C (odstranění vlhkosti) v souladu s literárními zdroji [20], [22], [23].

- Zóna II: teplotní rozsahy 195–310 °C a 310–380 °C (rozklad hemicelulózy, resp. celulózy) odpovídá zejména těm z literárních zdrojů [1], [20], [22], kde k rozkladu hemicelulózy nedošlo. překrývá rozklad celulózy.
- Zóna III: teplotní rozsah 380–610 °C (rozklad ligninu) odpovídá literárním zdrojům [1], [20], [21] podle počáteční teploty rozkladu. Teplotní rozsah 610–770 °C odpovídá odstranění anorganické hmoty [22].
- Zbytková hmotnost vzorku bukových listů při teplotě 1384 °C byla 27,8 %.

Výsledné (uvedené) hodnoty hmotnostních koncentrací znečišťujících látek byly přepočteny na normální podmínky ($T = 273,15 \text{ K}$; $p = 101\,325 \text{ Pa}$) a referenční objemový podíl kyslíku ve spalinách (13 %).

Jak uvádí Tabulka 23, tepelný výkon se obvykle pohyboval mezi 5,2 až 6,3 kW s jednou anomálií (8,1 kW). Energetická účinnost se pohybovala mezi 67,7 % a 74,3 % (přepočet na sezónní energetickou účinnost u tohoto typu kamen snížil tyto hodnoty o 10 %) z důvodu relativně vysoké teploty spalin na výstupu z kamen. Limity hmotnostní koncentrace CO byly splněny během 5 ze 7 testů. Limity hmotnostní koncentrace OGC byly splněny během 5 ze 7 testů. Během všech testů nebyly splněny limity NO_x. Hmotnostní koncentrace PM ve spalinách nebyla během testů pozorována.

Během procesu spalování vykazovaly brikety vyšší tendenci k nesoudržnosti; rozpadly se dříve než standardní dřevěné brikety.

Tabulka 23 Výsledky spalovacích zkoušek

Číslo režimu			1	2	3	4	5	6	7
Zkušební čas		h	0,8	0,7	0,9	0,6	0,7	0,7	0,8
Průměrný tepelný výkon během režimu		kW	6,0	6,3	5,2	8,1	6,2	6,0	5,4
Spotřeba paliva		kg/h	2,1	2,1	1,8	2,8	2,2	2,2	2,0
Příkon		kW	8,3	8,5	7,2	11,3	8,7	8,7	8,0
Sezónní energetická účinnost vytápění		%	62,0	64,3	62,7	61,7	61,5	59,0	57,7
Teplota spalin		°C	338	321	304	318	304	279	282
Objemový podíl kyslíku ve spalinách		% _{vol.}	10,8	10,0	11,0	11,1	11,1	12,2	12,0
Poměr přebytku vzduchu		-	2,07	1,92	2,11	2,13	2,11	2,40	2,32
Referenční objemový podíl kyslíku			13	13	13	13	13	13	13
Znečišťující látky ve spalinách (přepočteno na referenční objemový podíl kyslíku 13 %)	CO	% _{hm.}	1,508	1,086	1,514	1,436	1,084	1,409	1,379
	NO _x	% _{hm.}	267	281	277	321	339	378	356
	OGC	% _{hm.}	38	32	98	92	97	228	256
	CO ₂	% _{hm.}	148	148	148	147	148	146	146

Poznámka: Konečná hmotnostní koncentrace NO_x se přepočítá na NO₂

Zelená barva symbolizuje splněné hodnoty dle nařízení Komise (EU) 2015/1185; červená barva symbolizuje nenaplněné hodnoty dle nařízení Komise (EU) 2015/1185.

Energetické a finanční náklady výroby briket

Náklady na výrobu lisovaných briket se mohou lišit podle několika faktorů. Prvním faktorem je proces sběru, kdy typ terénu, druh stromů, jejich hustota a použitá metoda dramaticky mění náklady na sběr listů. Nejdražší část sběru listů, zejména v EU, je cena lidské práce.

Druhým faktorem je doprava. V tom spočívá hlavní výhoda tohoto typu paliva, protože vzniká ve městě a ve stejném městě je možné jej použít. Ať už se s bioodpadem (listím) dál děje cokoli, zeleň ve městech je nutné udržovat, takže náklady na svoz a dopravu lze z celkového pohledu přípravy briket zanedbat.

Třetím faktorem je proces sušení, který závisí na způsobu sušení listů. Lze je sušit přirozeně nebo technologicky. Pokud dojde k jejich samovolnému vysušení, je potřeba velký zastřešený a větraný prostor. V tomto případě je jediným požadavkem pravidelné prohrabávání vrstvy listů. Není potřeba žádná další energie. Pokud se suší technologicky v nějaké kontinuálně sušící místnosti, rychlost sušení směrem k požadovanému hmotnostnímu podílu vody je mnohonásobně rychlejší. V tomto případě je spotřeba energie na sušení listů od surového hmotnostního podílu vody (65 %) po briketovací hmotnostní podíl vody (15 %) na kg briket přibližně 3,7 MJ tepelné energie (počítáno jako latentní výparné teplo voda). To je přibližně 24 % celkové chemicky vázané energie v briketách. Sběr listů ze sušičky by mohl výrazně snížit spotřebu energie.

Čtvrtým faktorem je samotné briketování. Existuje mnoho briketovacích lisů. Mnohé z nich umožňují lisování briket z různých druhů materiálů, jako je listů. Jejich cena se pohybuje mezi 1 000 a 20 000 € v závislosti na hmotnostním toku briket na výstupu. Spotřeba energie tohoto procesu je přibližně 0,36 MJ elektrické energie na kg briket, což je přibližně 2,3 % z celkové chemicky vázané energie v briketách.

Shrnutí kapitoly:

Bukové listí bylo sbíráno, samovolně sušeno, drceno a lisováno do briket. Tyto brikety byly tmavé, standardního tvaru a proměnné délky. Bukové listové brikety byly analyzovány a ve srovnání se standardními dřevěnými (s certifikací ÖNORM) vykazovaly vyšší hmotnostní podíl popela a nižší výhřevnost. Termogravimetrickou analýzou byly popsány teplotní rozsahy rozkladu hemicelulózy, celulózy a ligninu.

Několik let stará, pravidelně používaná kamna (Storch ESTELLI KERAMIK) splnila při spalovacích zkouškách s tímto druhem paliva aktuální legislativní limity. Příprava listových briket by mohla spotřebovat cca 2,3 % až 26,4 % z celkové chemicky vázané energie v briketách podle typu jejich sušení.

7. Spalování polyetylenových sáčků a dřeva v domácnostech

Velmi rozšířenou praxí v domácnostech je spoluspalování plastů s dřevem. Vzhledem ke škodlivosti této praxe je nezbytné kvantifikovat jeho vliv na emise plyných znečišťujících látek, částice (PM), polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH) a 1,3,5-trifenybenzen (135TPB). V rámci provedených měření byly spalovány polyetylenové nákupní tašky ze supermarketů (PE) a polyethylentereftalátové lahve (PET), byly spalovány jako doplňkové palivo s bukovými poleny (BL) ve starém prohořivacím kotli 20 kW při jmenovitém i sníženém tepelném výkonu.

Zvolené palivo

Jako palivo byly zvoleny zcela nové nákupní tašky ze supermarketu (PE, přibližné rozměry 20 x 30 cm) vyrobené z vysoko-objemového polyetylenu a recyklované polyethylentereftalátové lahve (PET, o objemu 1,5-2,5 l), které byly doplněny o dvě doplňková paliva pro účely experimentů. Plastové láhve byly stlačeny, za účelem snížení jejich objem před spalováním.

Pro simulaci reálných podmínek spoluspalování plastového odpadu, byly oba plasty páleny jako celek s bukovými poleny. Buková polena (BL, přibližný rozměr 8x8x40 cm) byla sušena na vzduchu pod přístřeškem po dobu 3 let před použitím. U všech spalovacích experimentů byl poměr buková polena:plasty byl 93:7 (w/w). Dávka paliva byla složená z tenké vrstvy plastu mezi vrstvami bukových polen. Hlavní charakteristiky testovaných paliv shrnuje Tabulka 24.

Tabulka 24 Základní složení a hlavní charakteristiky testovaného paliva

Vlastnosti paliva	BL	BL-PET	BL-PE	PET ^a	PE ^a
Uhlík [%]	43,8	44,9	46,5	59,8	83,3
Kyslík [%]	39,8	39,5	37,3	35,0	2,5
Vodík [%]	5,5	5,5	6,1	5,3	13,9
Dusík, [%]	0,1	0,11	0,13	<0,2	<0,2
Chlor [mg/kg]	50	50	50	n/d	n/d
Voda [%]	10,2	9,5	9,5	n/d	n/d
Popel [%]	0,58	0,54	0,54	n/d	n/d
Spodní výhřevnost [MJ/kg]	15,9	16,7	18,0	28,2	46,2
Zvýšení ve spodní výhřevnosti (proti BL) [%]	0,0	5,1	13,1	-	-

n/d – není určeno

^a Plasty byly spalovány pouze ve směsi s bukovými poleny

Testovací zařízení

Spalovací experimenty byly prováděny na zkušebním koutě sestávajícím z váhy, kotle, izolovaného potrubí, odsávání do digestoře ředícího tunelu, ředícího tunelu a ventilátoru. Ředící poměr byl počten pomocí poměru koncentrace CO₂ v potrubí za kotlem a v ředícím tunelu. Rychlost spali v ředícím tunelu byla udržována na stejné hodnotě během celého spalování. Aby se předešlo paměťovému efektu, byl kotel a potrubí mechanicky vyčištěny po každém dvojnásobném/trojnásobném experimentu se stejným palivem.

Postup a podmínky spalování

Pro experimenty byl využit běžný 20kW prohořivací kotel na tuhá paliva s manuálním příkládáním. Provoz kotle je periodický, protože se spálí celá dávka paliva najednou. Přestože toto zařízení nesplňuje emisní požadavky třídy 3 evropské normy EN 303-5 a od roku 2014 se v ČR neprodává, jedná se stále o nejrozšířenější kotel nejen v ČR, ale v celé střední a východní Evropě.

Přibližně 90 minut před každým experimentem bylo v kotli zatopeno obyčejnými bukovými poleny, a to za účelem vytvoření základní vrstvy žhavého dřeva, které je nezbytné pro zapálení zkoumaného paliva. Kotel byl provozován jak na jmenovitý, tak i na snížený tepelný výkon. Při jmenovitém výkonu byly spáleny dvě dávky paliva (15 kg každého, doba příkládání 2 hodiny) během 4 hodin. Při sníženém výkonu byla spálena pouze jedna dávka paliva (15 kg) za stejnou dobu 4 hodiny. Teplá voda z bojleru byla odváděna přes tepelný výměník, jehož výkon byl nastaven na teplotu zpětné vody 60°C. Všechny provedené spalovací zkoušky byly provedeny ve dvou nebo třech opakujících se cyklech. Experimenty shrnuje Tabulka 25.

Tabulka 25 Shrnutí provedených spalovacích experimentů

Pořadí experimentu	Palivo	Výstup ^a
1 – 3	BL	N
4 – 6	BL-PET	N
7 – 9	BL-PE	N
10 – 11	BL	R
12 – 13	BL-PET	R
14 – 15	BL-PE	R

^a N – nominální, R – redukováný

Výsledky experimentů

Klíčovým parametrem je posouzení emisí CO, TOC a PM, které jsou povinnými parametry v normě EN 303-5 Topné kolte. EF všech spalovacích experimentů shrnuje

Tabulka 26 Emisní faktory a hlavní charakteristiky spalovacích experimentů

	Jednotka	Nominální výkon			Redukovaný výkon ^b		
		BL	BL-PET	BL-PE	BL	BL-PET	BL-PE
Naměřené výsledky	kW	21.3 ± 0.8	21.8 ± 0.8	22.8 ± 0.5	10.8 ± 0.6	12.0 ± 0.4	13.0 ± 0.1
T ^a	°C	99 ± 4	109 ± 5	92 ± 2	47 ± 4	45 ± 3	38 ± 1
CO	g/kg	74 ± 21	91 ± 19	76 ± 12	113 ± 11	114 ± 12	111 ± 7
CO/CO ₂		0.05 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.045 ± 0.007	0.073 ± 0.008	0.070 ± 0.008	0.068 ± 0.004
TOC	g/kg	10 ± 6	14 ± 5	16 ± 5	34 ± 2	24 ± 3	41 ± 3
PM	g/kg	1.1 ± 0.4	1.8 ± 0.3	1.7 ± 0.2	6.8 ± 0.6	5.8 ± 0.7	7.5 ± 0.5
Sum of c-PAHs, total ^c	mg/kg	6.8 ± 2.2	11 ± 3.4	11 ± 1.7	4.5 ± 0.9	10 ± 2.4	4.5 ± 0.7
Sum of c-PAHs, particulate ^c	mg/kg	3.8 ± 2.0	6.8 ± 2.1	7.9 ± 2.2	3.5 ± 0.9	7.7 ± 1.7	4.2 ± 1.3
TEQ of c-PAHs, total ^c	mg TEQ/kg	1.4 ± 0.5	2.0 ± 0.7	2.4 ± 0.5	1.0 ± 0.2	1.9 ± 0.3	1.1 ± 0.1
TEQ of c-PAHs, particulate ^c	mg TEQ/kg	1.1 ± 0.6	1.8 ± 0.6	2.3 ± 0.5	0.9 ± 0.3	1.8 ± 0.3	1.1 ± 0.2
135TPB, total	µg/kg	<0.7	27 ± 8	6 ± 3	<0.7	78 ± 11	9 ± 4
135TPB, particulate	µg/kg	<0.7	24 ± 8	6 ± 2	<0.7	75 ± 9	9 ± 4
Ratio of TEQ of c-PAHs, particulate ^c	%	77	88	94	94	95	98
Ratio of 135TPB, particulate ^c	%	n/a	91	92	n/a	96	100

n/a – není určeno

^a Průměrná teplota v řadicím tunelu

^b Směrodatná odchylka vypočtená ze dvou hodnot

^c Vypočítáno z nezaokrouhlených čísel

Emisní faktor CO se pohyboval od 74 do 114 g/kg. Při jmenovitém výkonu byl při spalování pozorován nárůst emisí o 23 % u PET, zatímco vliv PE byl zanedbatelný. Při sníženém výkonu se emise CO ze spalování BL zvýšily o 53 % ve srovnání s nominálním výkonem. Spalování jakýchkoliv plastů nemělo žádný vliv na emise této znečišťující látky. Snížení tepelného výkonu ovlivňuje emise CO více než spalování plastů. Poměr CO/CO₂ byl vypočítán pro hodnocení účinnosti spalovacího procesu. Poměr zůstal pod 0,08 (0,045 – 0,073) ve všech 15 experimentech, které naznačují celkovou účinnost spalování. Vyšší poměry CO/CO₂ byla pozorována při sníženém výkonu, což ukazuje na méně účinné spalování pro tyto podmínky. Překvapivě došlo po přidání PE do paliva ke zlepšení účinnosti spalování, což způsobilo nejnižší poměry CO/CO₂ při jmenovitém i sníženém výkonu.

Emisní faktor pro TOC se pohyboval od 10 do 41 g/kg. Emise TOC byly více než 3krát vyšší při sníženém výkonu ve srovnání s nominálním. Společné spalování PET a TE vykazovalo rozdíly mezi testovanými podmínkami. Zatímco PE dále zvýšil emise TOC o 60% (nominální) a o 20 % (snížené), spalování PET vedlo k nárůstu o 40 % (nominální), ale v případě sníženého výkonu došlo ke snížení emisí o 30 % ve srovnání se spalováním čistých bukových polen. Z tohoto jevu můžeme usuzovat, že provozní podmínky mají větší vliv na emise než samotná přítomnost plastů v palivu.

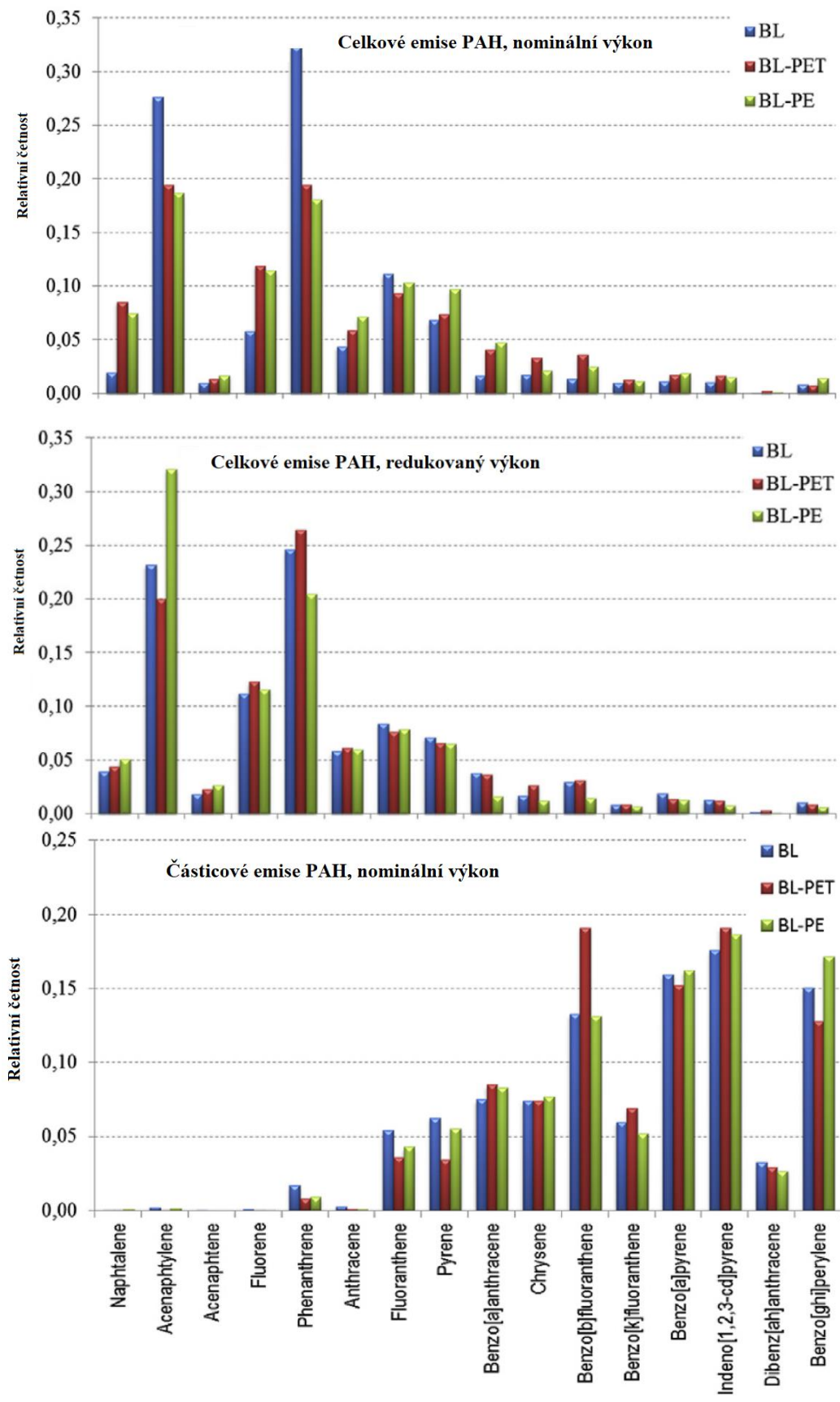
Emisní faktor PM se pohyboval od 1,1 do 7,5 g/kg a vykazoval podobné trendy jako TOC: zvýšení emisí o 63 % a 54 % během spalování PET a PE při jmenovitém výkonu. Korekční analýza ukázala vztah mezi PM a TOC ($r_s=0,91$), CO ($r_s=0,80$), měřený výkon ($r_s=-0,92$), teplota za kotlem ($r_s=-0,93$).

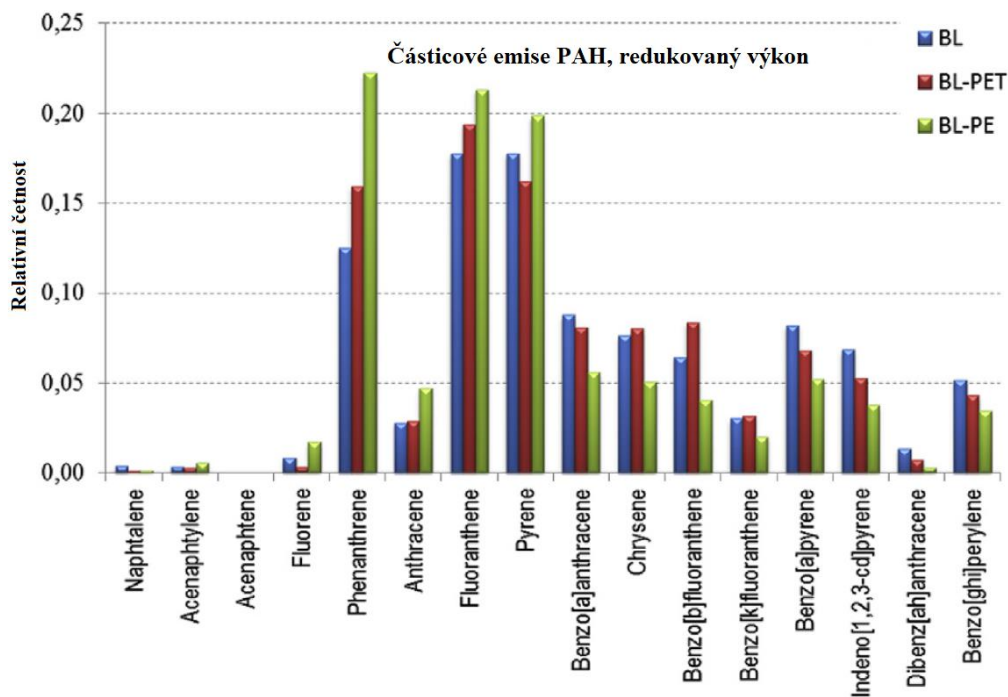
I když podmínky spalování nebyly absolutně identické (nižší rychlost podávání paliva 6,9 kg/h, což mělo za následek nižší naměřené hodnoty výkonu 19,3 kW, ES CO (74 g/kg), PM (1,1 g/kg) a TOC (10 g/kg) oproti bukovým polenům spalovaným při jmenovitém výkonu.

Spalování polyetylenových plastů nemělo na emise NO_x vliv.

Spalování dřeva je významným zdrojem emisí PCDD/F do okolního prostředí, to ale platí především pro spalování kontaminovaného dřeva, protože obsahuje chlór v palivu, který je rozhodující pro míru emisí PCDD/F.

Spalování polyetylenových plastů mělo jen malý dopad na profilech 16 PAU v emisích, jak uvádí Graf 19.



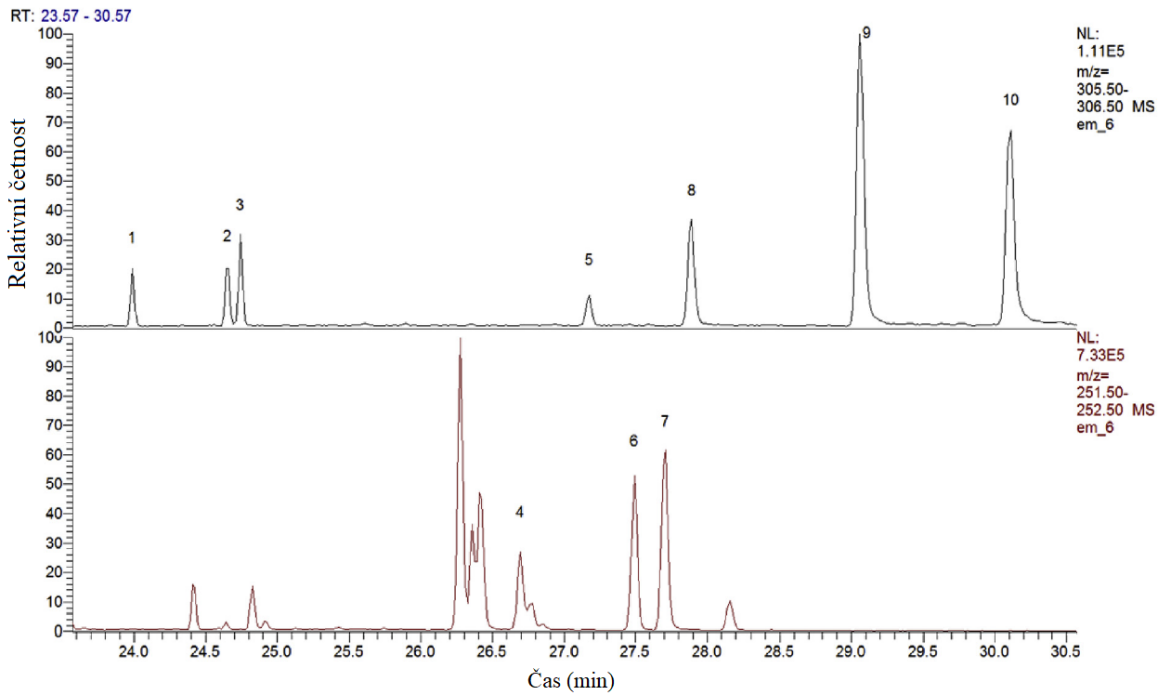


Graf 19 Položkový profil 16 PAH v emisích (BL – buková polena; BL-PET – buková polena a PET láhve; BL-PE – buková polena a plastové nákupní sáčky)

Největší vizuální rozdíly byly pozorovány v relativním množství celkového PAH při jmenovitém výkonu: spoluspalování obou plastů vedlo k vyššímu množství fluorenu a většiny 4-6 cyklických PAU. Rozdíly byly patrné i mezi složením profilů PAH, kdy při nominálním výkonu, byly nejvýznamnější emise byly benzo[b]fluoranthene, benzo[a]pyren, indeno[1,2,3-cd]pyren a benzo[ghi]perylene, zatímco při sníženém výkonu dominovaly emise fenantrenu, fluoranthene a pyren. Taková dominance volatilních PAU ve fázi částic mohla být způsobena nižší teplotou spalín (viz Tabulka 26).

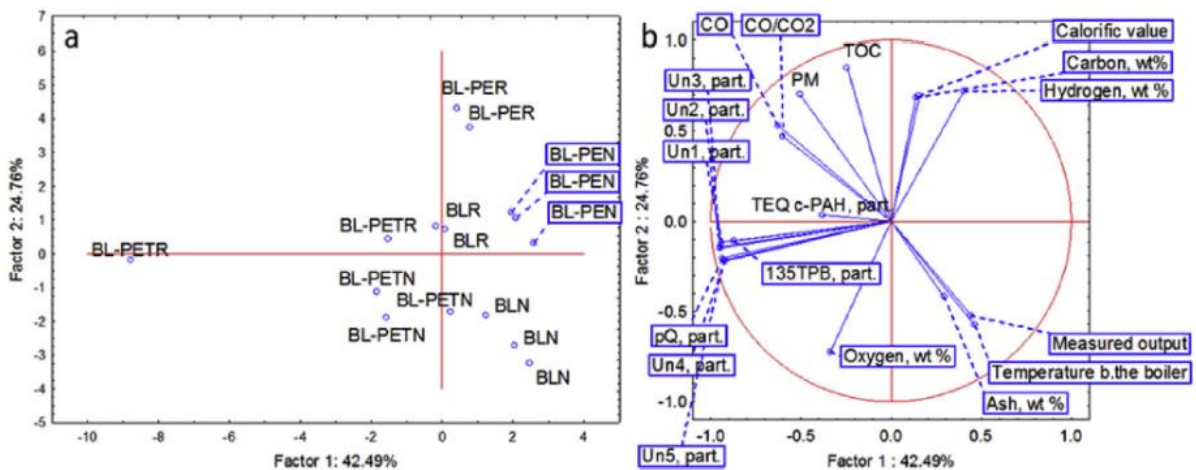
Výhradní sloučeninou v emisích ze společného spalování PE byl 135TPB. Překvapivě bylo v emisích ze spoluspalování PET detekováno šest dalších hojnějších vrcholů (viz Graf 20). Podobě jako hmotnostní spektrum 135TPB i ty ze všech těchto neznámých sloučenin obsahují nejhojnější ionty 306. Lze tedy předpokládat, že neznámými sloučeninami jsou jiné izomery trifenylbenzenu nebo quaterfenylu. Fragmenty 2,9-dimethylpicen produkují i tyto ionty, avšak jeho výskyt v emisích ze spoluspalování dřeva a plastů je nepravděpodobný, protože vznik tohoto prvku je spojen se spalováním uhlí.

Vzhledem k podobnosti hmotnostních spekter izomerních sloučenin, bylo nezbytné provést identifikaci neznámých sloučenin. Analýza těchto sloučenin byla provedena pomocí analýzy hlavních složek (PCA – Principal component analysis).



Graf 20 Výběr 135 TPB, neznámých izometrických sloučenin a doprovázejících PAU při spalování PET

Vizualizované výsledky PCA uvádí Graf 21. Je zřejmé, že experimenty, ve kterých byla spalována buková polena a buková polena s PE, jsou oddělené od všech ostatních podél osy faktoru 1. Na druhou stranu téměř všechny experimenty, ve kterých byl použit PET jako přídavné palivo, leží vlevo k ose y, viz Graf 21. Pozice vektorů v korelačním kruhu ukazuje na silnou negativní korelaci pQ, pěti neznámých sloučenin a 135TPB s faktorem 1, zatímco korelace c-PAU vykazuje stejný trend, ale je mnohem slabší, viz Graf 21., všechny neznámé sloučeniny ukazují na společné spalování PET. V důsledku toho by mohla být neznámá sloučenina použita jako vhodný marker pro spalování s plasty.



Graf 21 PCA vizualizované výsledky spalovacích experimentů s PET

Shrnutí kapitoly:

Z výsledků provedených experimentálních měření, která simulovala široce rozšířenou praxi spalování plastu v domácnostech vyplynulo, že v případě emisí CO, TOC a PM měly větší vliv podmínky provozu samotného zařízení než přidání plastu k palivu.

Spoluspalování PET vedlo k výraznému nárůstu emisí c-PAH při jmenovitém i sníženém výkonu, zatímco dopad PE byl relevantní pouze u jmenovitého výkonu. V emisích z obou plastu po spalování, bylo přítomno 135 TPB, což lze využít jako univerzální indikátor pro spalování polyethylenových plastů. V emisích bylo detekováno šest dalších neznámých sloučenin, jedna z nich byla identifikována jako pQ, který se opět jeví jako vhodný indikátor pro spoluspalování PET plastů. Zbývající dosud neidentifikované sloučeniny jsou pravděpodobně jiné izomery quaterfenylu nebo trifenylbenzenu, které také mohou sloužit jako identifikátory pro spalování PET.

8. Vliv druhu biomasy a teploty zpopelnění na vlastnosti popelů pevných paliv

Recyklace a opětovné využití popela z biomasy je zásadní z ekonomického a environmentálního hlediska. Kromě toho zbytkový popel tvoří strusku uvnitř kotlů, která zhoršuje proces spalování, snižuje přenos tepla a způsobuje problémy s vysokoteplotní korozi a erozí, což vše snižuje životnost zařízení. Pro provoz různých typů topenišť na tuhá paliva je důležité znát teplotu tání obsaženého popela. Tato teplota v praxi určuje, jak vysoké mohou být spalovací teploty v topeništích, aby nedocházelo k poruchám spalovacích zařízení (utěsnění mezer v roštech struskou, vytváření usazenin na stěnách výměníku). Jedním ze způsobů spalování paliv s nízkou teplotou tání popela je použití různých přísad.

Bod tání je teplota, při které se roztaví všechny složky obsažené v popelu. Tento proces probíhá v širokém teplotním intervalu (200 K nebo více), během kterého se mění skupenství popela. Složení popela a okolní atmosféra ve spalovací komoře ovlivňují teplotu tání popela. Popely obsahují především SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 , TiO_2 a P_2O_5 . Kromě těchto oxidů mohou popely obsahovat různé prvky (Zn, Pb, As, Ge, Be, Ni, Cd atd.). Přítomnost alkalických kovů a kovů alkalických zemin ovlivňuje tvorbu tvrdých a popelových usazenin. Alkalické kovy snižují bod tání popela, zatímco kovy alkalických zemin bod tání zvyšují. SiO_2 a Al_2O_3 také ovlivňují teplotu tání tím, že ji zvyšují. FeO , Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO , MgO , Na_2O a K_2O však snižují teplotu tání.

Pro odhad pravděpodobnosti usazování a tvorby strusky ve spalovacích jednotkách existují indexy struskování a zanášení. Tyto indexy jsou založeny na elementárním složení popela z biomasy a jeho chování při spalování a jejich rovnice jsou založeny především na hodnotách získaných z uhlí. Různé indexy struskování a zanášení jsou obsah oxidu křemičitého (SiO_2), poměr křemík-oxid hlinitý (S/A), obsah chlóru v palivu, poměr zásaditých a kyselých oxidů (B/A), index znečištění (Fu), Babcockův index (Rs), index viskozity strusky (Sr), poměr železo-vápník (I/C), celkové alkálie (TA), index aglomerace lože (BAI) a index tavitelnosti popela (AFI).

Souhrn indexů struskování a zanášení znázorňuje Tabulka 27.

Tabulka 27 Indexy struskování a zanášení

Index	Rozsah	Sklon ke struskování a zanášení	Zdroj informací
SiO_2	<20	nízký	[32]
	20-25	střední	
	>25	vysoký	
Poměr křemíku a oxidu hlinitého (S/A)	<0,31, >3	nízký	[33]
	0,3-3	vysoký	
CL (%)	<0,2	nízký	[32], [34]
	0,2-0,3	střední	
	0,3-0,5	vysoký	
	>0,5	extrémně vysoký	

Poměr zásaditých a kyselých oxidů (B/A)	<0,5	nízký	[32]
	0,5-1	střední	
	1,0-1,75	vysoký	
	>1,75	extrémně vysoký	
Index znečištění (Fu)	<0,6	nízký	[32]
	0,6-40	střední	
	>40	vysoký	
Babcockův index (Rs)	<0,6	nízký	[32]
	0,6-2	střední	
	2,0-2,6	vysoký	
Index viskozity strusky (Sr)	>72	nízký	[32], [34]
	65-72	střední	
	<65	vysoký	
Poměr železo-vápník (I/C)	<0,31,>3	nízký	[33]
	0,3-3	vysoký	
Celkové alkálie (TA)	<0,3	nízký	[33]
	0,3<TA<0,4	střední	
	>0,4	vysoký	
Index aglomerace lože (BAI)	<0,15	vysoký	[32]
Index tavitelnosti popela (AFI)	>1342	nízký	[32]
	1232-1342	střední	
	1052-1232	vysoký	
	<1052	extrémně vysoký	
Teplota deformace (DT) (°C)	>1100	nízký	[32]
	900-1100	střední	
	<900	vysoký	

U paliv z biomasy (zejména paliv neobsahujících dřevo) dochází při spalování k masivnímu struskování teplosměnných ploch kotlů.

Pro experimenty bylo vybráno šest druhů pevných biopaliv (kukuřičné klasy, slunečnicové slupky, olivové výlisky, pelety ze sena a rýžové slupky), jedno palivo jakožto zástupce alternativních paliv (sušený kal z výroby papíru, papírenský kal) a dva druhy fosilních paliv (lignit a bituminózní uhlí) jejich přehled znázorňuje Tabulka 28. Rýžové slupky byly studovány různými autory, kukuřičné klasy od Yao [35][36][37], slunečnicové slupky od Rizvi a odpady z oliv několika autory. Označení a teploty popela shrnuje Tabulka 28. Teplota pro přípravu popela (550°C) byla zvolena podle normy EN ISO 18122 pro pevná biopaliva, teplota 815°C byla zvolena podle normy ISO 1171 pro pevná minerální paliva, teplota 975°C byla teplotou použitou pro stanovení hlavních prvků metodou XRF.

Tabulka 28 Označení vzorků paliv a teploty přípravy popela

Název vzorku	Označení a teplota přípravy popela
popel z papírenského kalu	PSA_550
popel z kukuřičného klasu	CCA_550
popel ze slupek slunečnice	SHA_550
popel z pelet ze sena	HPA_550
popel z olivových výlisků	OPA_550
popel z olivových výlisků	OPA_815
popel z olivových výlisků	OPA_975
popel z rýžových slupek	RHA_550
popel z rýžových slupek	RHA_815
popel z rýžových slupek	RHA_975
hnědouhelný popel	LA_815
hnědouhelný popel	LA_975
popel z černého uhlí	BCA_815
popel z černého uhlí	BCA_975

Výsledné hodnoty teploty deformace (DT), sférické teploty (ST), hemisférické teploty (HT) a teploty průtoku (FT) v redukčních a oxidačních atmosférách uvádí Tabulka 29.

DT je teplota, při které se objevují první známky zaoblení špičky nebo hran zkušební vzorku v důsledku roztavení; ST je teplota, při které se výška zkušební tělesa ve tvaru jehlanu nebo komolého kužele rovná šířce základny; HT je teplota, při které zkušební vzorek tvoří přibližně polokouli, a FT je teplota, při které se tavenina popela šíří po nosném povrchu ve vrstvě.

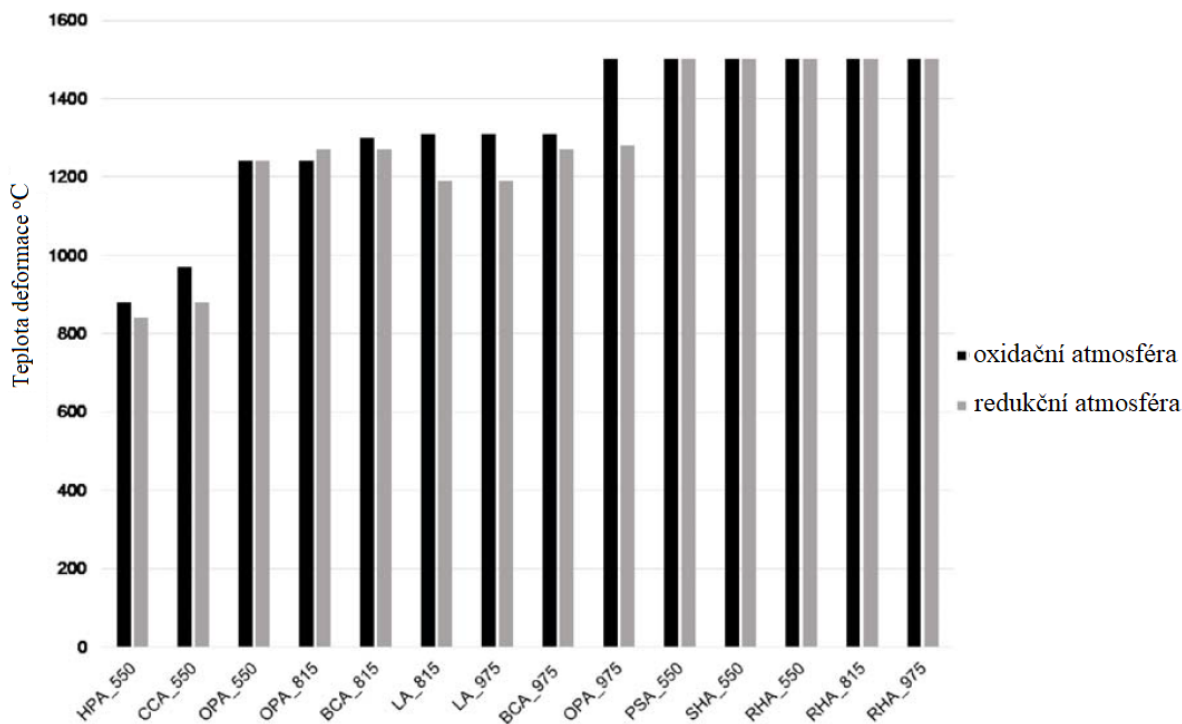
Pro biomasu byl použit hodnotící index DT21. DT pod oxidační a redukční atmosférou pro všechny analyzované vzorky popela znázorňuje Graf 22. Obecně se teploty tání popela zvyšovaly se zvyšující se teplotou zpopelnění. Nejnížší teploty jsou pozorovány u popela vyrobeného z pelet ze sena a kukuřičných klasů, u kterých jsou DT nižší než 1000 °C. To by mohl být problém u systémů s fluidním ložem nebo zplyňování, které fungují pod 1000 °C. V případě kukuřičných klasů odráží nízká teplota tání jejich nízkou koncentraci vápníku a vysokou koncentraci alkálií, jak je uvedeno níže. Na druhou stranu u popela z papírenského kalu, slunečnicových slupek a rýžových slupek DT přesahuje 1500 °C. Papírenský kal má nejvyšší DT, což lze vysvětlit vysokým obsahem oxidu křemičitého a vápníku spolu s nízkým obsahem alkálií, jak je uvedeno níže [33].

Tabulka 29 Stanovení teploty spalování popela

Vzorek popela	Označení a teplota přípravy popela	Teplota deformace DT [°C]	Sférická teplota ST [°C]	Hemisférická teplota HT [°C]	Teplota průtoku FT [°C]
		(redukční atm.)	(redukční atm.)	(redukční atm.)	(redukční atm.)
popel z papírenského kalu	PSA_550	>1500	>1500	>1500	>1500
popel z kukuřičného klasu	CCA_550	880	900	970	1080
popel ze slupek slunečnice	SHA_550	>1500	>1500	>1500	>1500
popel z pelet ze sena	HPA_550	840	1020	1160	1300
popel z olivových výlisků	OPA_550	1240	1250	1260	1330
popel z olivových výlisků	OPA_815	1270	1320	1370	1400
popel z olivových výlisků	OPA_975	1280	1310	1360	1410
popel z rýžových slupek	RHA_550	>1500	>1500	>1500	>1500
popel z rýžových slupek	RHA_815	>1500	>1500	>1500	>1500
popel z rýžových slupek	RHA_975	>1500	>1500	>1500	>1500
hnědouhelný popel	LA_815	1190	1270	1300	1360
hnědouhelný popel	LA_975	1190	1240	1250	1330
popel z černého uhlí	BCA_815	1270	1300	1340	1380
popel z černého uhlí	BCA_975	1270	1300	1320	1370

Vzorek popela	Označení teplota přípravy popela	Teplota deformace DT [°C]	Sférická teplota ST [°C]	Hemisférická teplota HT [°C]	Teplota průtoku FT [°C]
		(oxidační atm.)	(oxidační atm.)	(oxidační atm.)	(oxidační atm.)
popel z papírenského kalu	PSA_550	>1500	>1500	>1500	>1500
popel z kukuřičného klasu	CCA_550	970	1000	1030	1100
popel ze slupek slunečnice	SHA_550	>1500	>1500	>1500	>1500
popel z pelet ze sena	HPA_550	880	970	1110	1260
popel z olivových výlisků	OPA_550	1240	1270	1290	1330
popel z olivových výlisků	OPA_815	1240	1280	1300	1460
popel z olivových výlisků	OPA_975	>1500	>1500	>1500	>1500
popel z rýžových slupek	RHA_550	>1500	>1500	>1500	>1500
popel z rýžových slupek	RHA_815	>1500	>1500	>1500	>1500
popel z rýžových slupek	RHA_975	>1500	>1500	>1500	>1500
hnědouhelný popel	LA_815	1310	1320	1330	1350
hnědouhelný popel	LA_975	1310	1320	1330	1350
popel z černého uhlí	BCA_815	1300	1310	1340	1380
popel z černého uhlí	BCA_975	1310	1320	1340	1390

Poznámka: DT: teplota deformace, ST: sférická teplota, HT: hemisférická teplota, FT: teplota průtoku



Graf 22 Teplota deformace v oxidační a redukční atmosféře pro popel z biomasy a uhlí

Rozdíly mezi jednotlivými tavnými teplotami (DT, ST, HT a FT) vzorků uhelného popela připravené při 815°C a 975°C jsou malé a v rámci tolerance reprodukovatelnosti použité metody (± 40 K). Rozdíly mezi jednotlivými teplotami tavení pro popel z olivových výlisků připravených při různých teplotách se v redukční atmosféře pohybují v rozmezí 40–100 K a nelze je rozlišit vzhledem k teplotám tavitelnosti nad 1500 °C u popela z rýžových slupek.

U popela z pelet ze sena lze pozorovat značné rozdíly mezi teplotami sekvenčního tavení při teplotě přípravy popela 550°C, což ukazuje na pomalé zanášení uvnitř kotlů.

Hlavní koncentrace prvků a chloridů v popelu

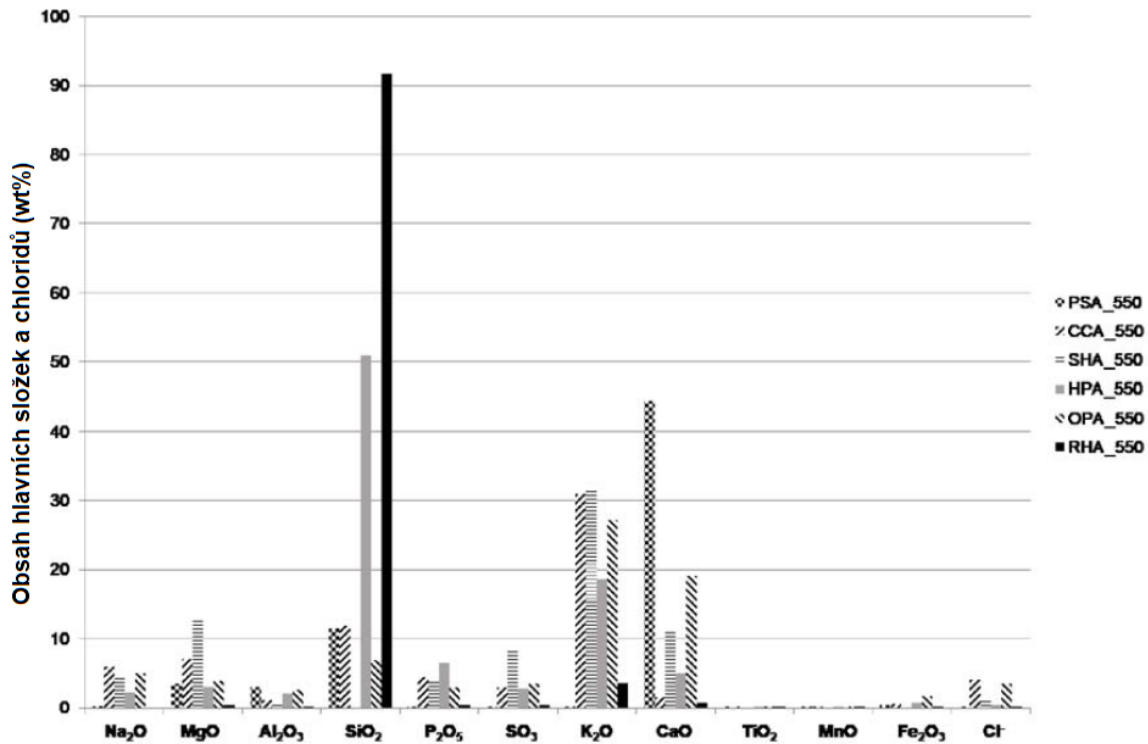
Oxidy v popelu z biomasy lze rozdělit na oxidy kyselé (SiO_2 , Al_2O_3 , SO_3 atd.) a zásadité oxidy (K_2O , CaO , MgO , Na_2O , Fe_2O_3 , P_2O_5 atd.). Koncentrace hlavních prvků a chloridů uvádí Tabulka 30, Graf 23,

Graf 24.

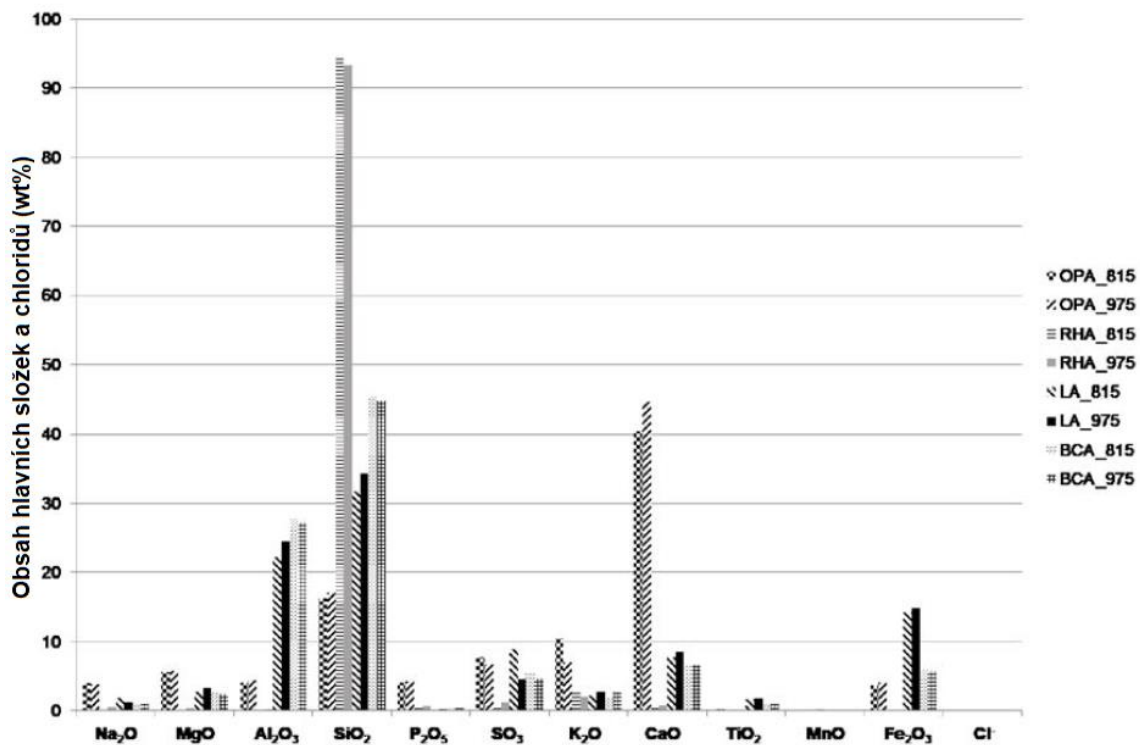
Tabulka 30 Koncentrace hlavních složek a chloridů v popelu

Vzorek		popel z papíren. kalu	popel z kukuřič. klasu	popel ze slupek slunečnice	popel z pelet ze sena	popel z olivových výlisků	popel z olivových výlisků	popel z olivových výlisků	popel z rýžových slupek	popel z rýžových slupek	popel z rýžových slupek	hnědo-uhelný popel	hnědo-uhelný popel	popel z černého uhlí	popel z černého uhlí	
		PSA_550	CCA_550	SHA_550	HPA_550	OPA_550	OPA_815	OPA_975	RHA_550	RHA_815	RHA_975	LA_815	LA_975	BCA_815	BCA_975	
Hlavní prvky + chloridy	Na ₂ O	wt%	0.36	5.90	4.60	2.20	5.00	4.00	3.80	<0.03	<0.03	0.46	1.94	1.20	1.13	1.05
	MgO	wt%	3.47	7.00	12.70	3.09	3.89	5.60	5.78	0.37	0.16	0.41	2.75	3.24	2.53	2.45
	Al ₂ O ₃	wt%	3.09	1.10	0.76	2.04	2.63	4.11	4.33	0.14	0.12	0.23	22.20	24.60	27.80	27.30
	SiO ₂	wt%	11.50	11.90	0.16	50.90	6.93	16.20	17.10	91.60	94.50	93.30	31.70	34.30	45.60	44.80
	P ₂ O ₅	wt%	0.09	4.50	3.80	6.50	2.89	4.17	4.25	0.49	0.32	0.70	0.10	0.20	0.35	0.38
	SO ₃	wt%	0.19	2.98	8.50	2.73	3.53	7.72	6.78	0.48	0.42	1.19	9.00	4.52	5.30	4.67
	K ₂ O	wt%	0.04	30.90	31.40	18.60	27.20	10.50	7.00	3.62	2.80	2.06	2.16	2.69	1.86	2.70
	CaO	wt%	44.50	1.55	11.00	4.97	19.00	40.40	44.70	0.76	0.62	0.82	7.74	8.47	6.46	6.55
	TiO ₂	wt%	0.14	0.09	0.01	0.09	0.12	0.24	0.27	0.01	0.03	0.01	1.61	1.71	1.06	1.10
	MnO	wt%	0.02	0.06	0.03	0.18	0.05	0.01	0.11	0.16	0.15	0.20	0.10	0.11	0.07	0.07
	Fe ₂ O ₃	wt%	0.40	0.55	0.11	0.75	1.70	3.75	4.14	0.04	0.05	0.07	14.20	14.90	5.91	5.71
	Cl ⁻	wt%	0.04	4.04	1.33	0.41	3.50	0.06	0.01	0.10	0.01	<0.01	0.01	0.02	0.02	0.01

Vysoká koncentrace SiO₂ je charakteristická pro rýžové slupky, zatímco u slunečnicových slupek je extrémně nízká. Ze vzorků mají rýžové slupky a kukuřičné klasy obvykle nejnižší obsah CaO, zatímco papírový kal má charakteristicky nejvyšší obsah CaO, kvůli přirozeně vysokému obsahu CaO ve dřevě. Extrémně vysoká koncentrace K₂O je charakteristická pro slunečnicový odpad a kukuřičné klasy; naproti tomu extrémně nízký obsah K₂O je pozorován v papírenském kalu. Nejvyšší koncentrace MgO je typicky pozorována ve slupkách slunečnice, zatímco nejnižší obsah MgO je charakteristicky pozorován ve slupkách rýže. Pro rýžové slupky a papírenské kaly je typický extrémně nízký obsah P₂O₅. Nejnižší hodnota Al₂O₃ je charakteristicky pozorována u slunečnicových slupek a rýžových slupek. Pro rýžové slupky a papírenské kaly je typická extrémně nízká koncentrace SO₃. Nejnižší obsah Fe₂O₃ je charakteristicky pozorován ve slupkách z rýže. Pro rýžové slupky a papírenské kaly je typický extrémně nízký obsah Na₂O.



Graf 23 Obsah hlavních prvků a chloridů v popelu z biomasy připravené při teplotě 550 °C



Graf 24 Obsah hlavních prvků a chloridů v popelu z biomasy připravené při teplotě 815 °C a 975 °C

Přítomnost Al₂O₃, MgO, CaO, Fe₂O₃ a SiO₂ v popelu může zvýšit bod tání, zatímco přítomnost P₂O₅, Na₂O a K₂O mohou snížit teplotu tání [38][39][40]. SiO₂, Al₂O₃ a CaO tedy mohou zvýšit teplotu tání v případě popela z papírového kalu a popela z olivových výlisků. Vysoké množství

P_2O_5 , Na_2O a K_2O může snížit bod tání popela z kukuřičných klasů. Popel připravený z kukuřičných klasů a slunečnicových slupek při $550^\circ C$ má vysoké množství draslíku, což umožňuje jejich snadné slinování. U popela z kukuřičných klasů je pozorována nízká teplota tání, což je v souladu s jeho vysokým obsahem draslíku. Vysoké teploty tání jsou pozorovány u popela z papírenského kalu a popela z rýžových slupek, což je v souladu s jejich nízkým obsahem draslíku.

Alkalické kovy se mohou snadno odpařovat při vysokých teplotách, pokud jsou ve formě anorganických solí, jako jsou chloridy, oxidy a sírany. Je známo, že alkálie produkují směsi roztavených solí prostřednictvím odpařování, kondenzace a sekundárních reakcí. Obohacování popela draslíkem, sírou a chlórem je velmi škodlivé kvůli riziku koroze [41][42]. Popel z kukuřičných klasů má vyšší obsah chlóru než ostatní popel. Vyšší koncentrace Si a Al v popelu z pelet ze sena mohou zachycovat halogenidy alkalických kovů (KCl, jak je analyzováno XRD, není znázorněno) prostřednictvím tvorby silikátů a hlinitokřemičitanů a podporovat tvorbu usazenin na horkých površích v kotlích.

Lignit a bituminózní uhlí dominuje $SiO_2-Al_2O_3$, který je běžný pro mnoho černých uhlí. Lignitový popel obsahoval velké množství Fe_2O_3 . Prvky jako Al, Fe a Ti měly vyšší koncentrace v uhelném popelu než v popelu z biomasy [41]. Obecně se obsah CaO, MgO, Fe_2O_3 , Al_2O_3 a nekovového P_2O_5 a SiO_2 zvyšoval se zvyšující se teplotou zpopelnění pro popel z olivových výlisků a popel z rýžových slupek (při $550^\circ C$ a $975^\circ C$). Největší rozdíl mezi různými teplotami popelovin pro popel z olivových výlisků byly v obsahu K_2O , jehož koncentrace klesala s rostoucí teplotou popela.

Výpočet indexů struskování a zanášení pro spalování biomasy a uhlí

Hodnoty různých indexů shrnuje Tabulka 31, Tabulka 32 a Graf 25, Graf 26. Indexy struskování byly porovnány s teplotami tavení popela.

Lignitové popílky vykazují střední až vysokou tendenci ke struskování/znečišťování, s výjimkou jejich Cl a indexu aglomerace lože. Výsledky indexů struskování/znečištění se u popílků z černého uhlí značně liší, protože indexy Cl, B/A, Rs, Sr a ložové aglomerace vykazují nízké tendence ke struskování/znečištění; na druhé straně, poměr SiO_2 , oxid křemičito-hlinitý, index zanášení, poměr železo-vápník, celkové alkálie a hodnoty AFI vykazují střední až vysoké sklony ke struskování/znečištění.

V případě obsahu SiO_2 má popel z pelet ze sena a popel z rýžových slupek pro všechny teploty přípravy vysoký sklon ke struskování. Vysoké hladiny oxidu křemičitého v palivech z biomasy mohou být způsobeny kontaminací půdou nebo pískem [32].

Tabulka 31 Index struskování a znečištění pro vybrané druhy popela

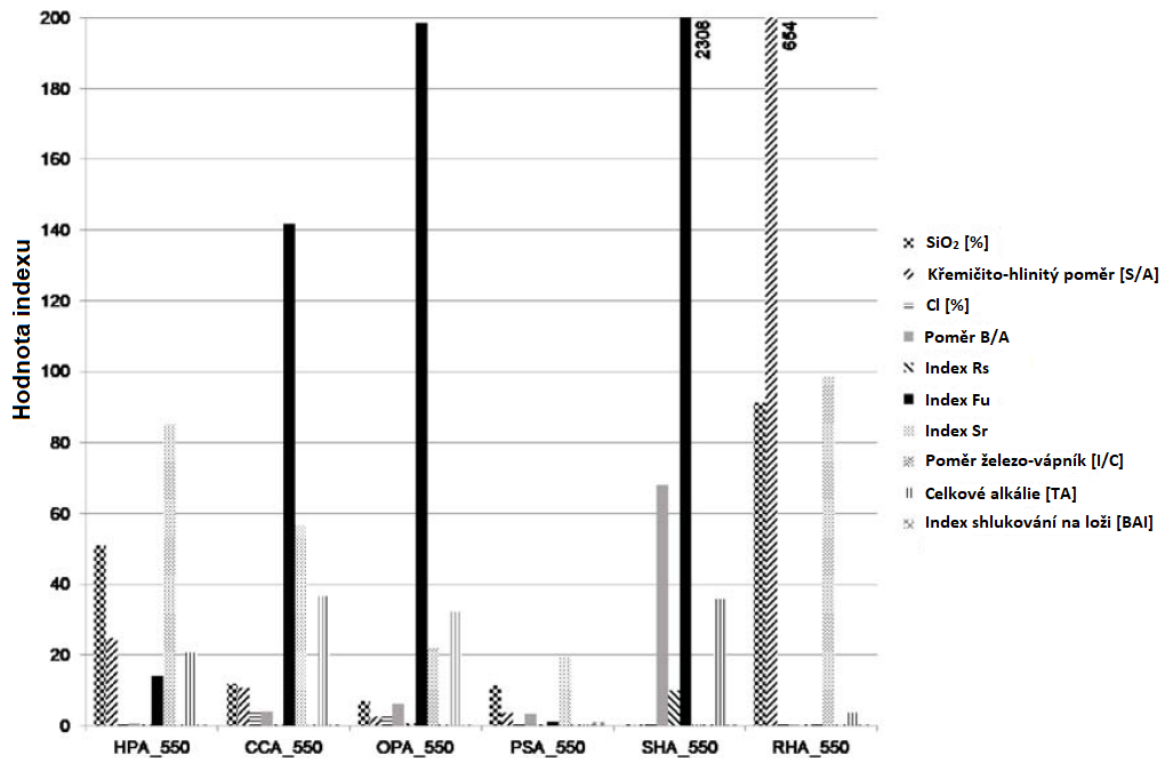
Název vzorku	Označení popela	SiO ₂ [%]	Křemičito-hliníkový poměr [S/A]	Cl [%]	Poměr B/A	Index Rs	Index Fu	Index Sr	Poměr železo-vápník [I/C]	Celkové alkálie [TA]	Index shlukování na loži [BAI]
Popel z pelet ze sena	HPA_550	50,90	24,95	0,41	0,68	0,05	14,16	85,25	0,15	20,80	0,04
Popel z kukuřičných klasů	CCA_550	11,90	10,82	4,04	3,85	0,19	141,71	56,67	0,35	36,80	0,01
Popel z olivových výlisků	OPA_550	6,93	2,63	3,50	6,17	0,67	198,62	21,99	0,09	32,20	0,05
Popel z olivových výlisků	OPA_815	16,20	3,94	0,06	3,33	0,36	48,27	24,56	0,09	14,50	0,26
Popel z černého uhlí	BCA_815	45,60	1,64	0,02	0,24	0,14	0,73	75,37	0,91	2,99	1,98
Hnědouhelný popel	LA_815	31,70	1,43	0,01	0,52	0,73	2,13	56,22	1,83	4,10	3,46
Hnědouhelný popel	LA_975	34,30	1,39	0,02	0,51	0,71	1,97	56,31	1,76	3,89	3,83
Popel z černého uhlí	BCA_975	44,80	1,64	0,01	0,26	0,15	0,96	75,28	0,87	3,75	1,52
Popel z olivových výlisků	OPA_975	17,10	3,95	0,01	3,21	0,34	34,67	23,84	0,09	10,80	0,38
Popel z papírenských kalů	PSA_550	11,50	3,72	0,04	3,32	0,07	1,34	19,21	0,01	0,40	0,99
Popel ze slupek slunečnice	SHA_550	0,16	0,21	1,33	68,18	10,03	2454,41	0,68	0,01	36,00	0,003
Popel z rýžových slupek	RHA_550	91,60	654,29	0,10	0,06	0,003	0,21	98,74	0,06	3,65	0,01
Popel z rýžových slupek	RHA_815	94,50	794,12	0,01	0,04	0,002	0,12	99,13	0,07	2,83	0,02
Popel z rýžových slupek	RHA_975	93,30	405,65	<0,01	0,05	0,002	0,12	98,63	0,08	2,52	0,03
	Extrémně vysoká										
	Vysoká										
	Střední										
	Nízká										

Tabulka 32 Index tavitelnosti popela (AFI) a teplota deformace (DT) pro vybrané popeloviny

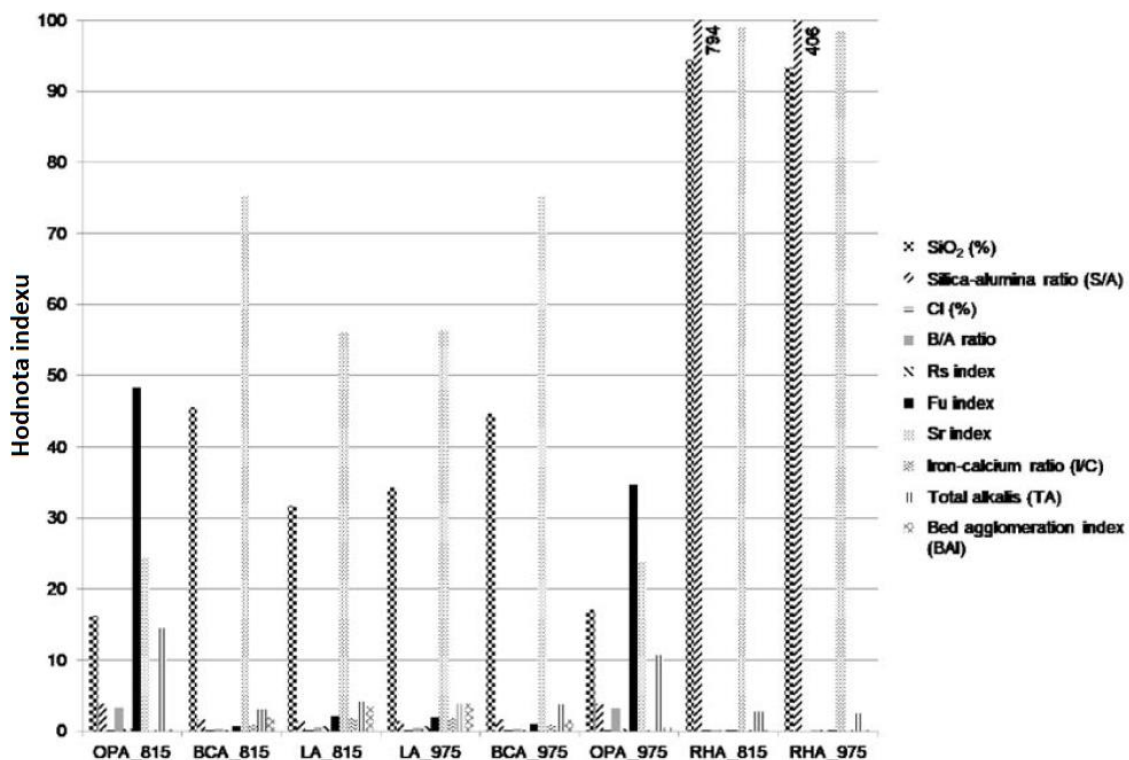
Název vzorku	Označení popela	AFI [°C] – oxidační atmosféra	AFI [°C] – redukční atmosféra	DT [°C] – oxidační atmosféra	DT [°C] – redukční atmosféra
Popel z pelet ze sena	HPA_550	926	904	880	840
Popel z kukuřičných klasů	CCA_550	982	898	970	880
Popel z olivových výlisků	OPA_550	1250	1244	1240	1240
Popel z olivových výlisků	OPA_815	1252	1290	1240	1270
Popel z černého uhlí	BCA_815	1308	1284	1300	1270
Hnědouhelný popel	LA_815	1314	1212	1310	1190
Hnědouhelný popel	LA_975	1314	1202	1310	1190
Popel z černého uhlí	BCA_975	1316	1280	1310	1270
Popel z olivových výlisků	OPA_975	>1500	1296	>1500	1280
Popel z papírenských kalů	PSA_550	>1500	>1500	>1500	>1500
Popel ze slupek slunečnice	SHA_550	>1500	>1500	>1500	>1500
Popel z rýžových slupek	RHA_550	>1500	>1500	>1500	>1500
Popel z rýžových slupek	RHA_815	>1500	>1500	>1500	>1500
Popel z rýžových slupek	RHA_975	>1500	>1500	>1500	>1500
	Extrémně vysoká				
	Vysoká				
	Střední				
	Nízká				

Hodnota B/A je menší než 0,5 pro popel z rýžových slupek, ale je výrazně vyšší pro popel ze slunečnicových slupek. Nízký index B/A pro popel z rýžových slupek lze přičíst jeho vysokému obsahu SiO₂, který implikuje zvýšenou přítomnost kyselých sloučenin. Obecně platí, že index B/A popela z olivových výlisků a popela z rýžových slupek klesal s rostoucí teplotou popela, což znamená, že v tomto popelu je více kyselých oxidů a méně zásaditých oxidů. Výpočet indexu Rs je odvozen z indexu B/A, který je extrémně vysoký pro popel ze slunečnicových slupek a střední rozsah pro popel z olivových výlisků připravený při 550 °C.

Pravděpodobnost struskování byla vysoká pro popel připravený z papírenského kalu, kukuřičných klasů, slunečnicových slupek a olivových výlisků podle jejich poměrů Sr, které byly nižší než 65.



Graf 25 Indexy strusky a zanášení pro popel z biomasy připravený při 550°C



Graf 26 Indexy strusky a zanášení pro biomasu a uhlý popel připravené při 815°C a 975°C

Tendence ke struskování na základě poměru silika-oxid hlinitý byla vysoká pro popel připravený z olivových pokrutin při 550 °C. Tendence ke struskování na základě poměru železo-vápník byla vysoká u popela z kukuřičných klasů.

Index tavitelnosti popela (AFI) byl extrémně vysoký pro popel z pelet ze sena a popel z kukuřičných klasů v oxidativní a redukční atmosféře. Nízká hodnota AFI byla vypočtena pro popel z olivových výlisků připravený při 975 °C, popel z papírových kalů, popel ze slupek slunečnice a popel ze slupek rýže. Zbývající popel měl střední hodnoty AFI.

Podle obsahu chloridů byly pozorovány extrémně vysoké sklony k zanášení popelem z kukuřičných klasů, popelem ze slupek slunečnice a popelem z olivových výlisků připravených při 550 °C a vysoký sklon k zanášení byl pozorován u popela z pelet ze sena.

Hodnota F_u indexu znečištění je menší než 0,6 u popela z rýžových slupek. Existuje tedy jen malá pravděpodobnost zanesení. V případě popela z papírenských kalů, popela z pelet ze sena a popela z olivových výlisků připravených při 975°C se hodnoty jejich indexu zanášení pohybují v rozmezí 0,6–40; proto mají střední pravděpodobnost znečištění. Popel z olivových výlisků připravený při 550 °C a 815 °C, popel z kukuřičných klasů a slupek slunečnice mají hodnoty indexu znečištění vyšší než 40, což naznačuje, že jejich pravděpodobnost znečištění je vysoká. Tendence k zanášení na základě celkových alkálií byla vysoká pro všechny typy popela.

Výsledky ukazují, že teplota zpopelnění rýžových slupek neměla významný vliv na její indexové hodnoty.

Vypočtené indexy struskování se ne vždy shodovaly s výsledky teplot tání popela, které uvádí Tabulka 28. Například teploty tání popela pro popel slunečnicových slupek jsou větší než 1500°C, zatímco hodnoty indexu B/A, indexu R_s , indexu S_r a indexu shlukování na loži indikují vysokou nebo extrémně vysokou tendenci ke struskování. Na základě praktických aplikací vede popel připravený ze spalování slunečnicových slupek ke struskování v kotlích; proto by jejich teploty tavení popela měly být nižší. Na druhou stranu dobrá shoda teplot tání (DT) s indexy strusky je patrná v případě popela z kukuřičného klasu, pro který jsou B/A index, S_r index, poměr železa a vápníku, index aglomerace lože a AFI v rozsahu vysoké nebo extrémně vysoké. Navíc u popela z rýžových slupek, kdy jsou teploty tavení větší než 1500 °C, jsou hodnoty indexu strusky nízké, s výjimkou SiO_2 a indexu aglomerace lože, které jsou vysoké.

9. Závěr

Z prezentovaných výsledků vyplývá, že vliv konstrukce spalovacího zařízení je jedním ze čtyř faktorů, které ovlivňují kvalitu spalování a tím i výsledné emise. Mezi tyto faktory řadíme kvalitu paliva, kvalitu konstrukce spalovacího zařízení, kvalitu obsluhy a kvalitu údržby.

V případě, že selže optimalizace jednoho nebo více z dalších tří faktorů, dochází ke zhoršení emisních nebo provozních parametrů. U moderních kotlů je selhání vždy vinou lidského faktoru.

Tato publikace se zaměřila především na kvalitu paliva a emise vznikající při jeho spalování v různých druzích spalovacích zařízení.

Je zde popsán vliv typu kotle, tepelného výkonu a spalovaného paliva na emisní faktory. Dále jsou zde zahrnuty zkušenosti se spalováním alternativních paliv a jejich vliv na emise. Zároveň jsou prezentovány výsledky ze spalování polyetylenových sáčků a PET lahví, jakožto zakázaného paliva, ale v praxi bohužel často realizovaných.

Cílem publikace bylo poskytnout pohled na využití různých paliv ať už tradičních, po alternativní až po zakázaná z pohledu tvorby různých plynných a tuhých znečišťujících látek s ohledem na použitá spalovací zařízení.

10. Seznam značek a zkratk

A	popelovina
AFI	index tavitelnosti popela
B/A	poměr zásaditých a kyselých oxidů
BAI	index aglomerace lože
C	uhlík v palivu
CO	oxid uhelnatý
CO ₂	oxid uhličitý
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
DT	teplota deformace
EF	emisní faktor
FT	teplota průtoku
Fu	index znečištění
H	vodík v palivu
h	hořlavina
HT	hemisférická teplota
KK	krbová kamna
ME	měrné emise
N	dusík v palivu
NMVOC	nemetanové těkavé organické látky
NO _x	oxidy dusíku
O	kyslík
PAU/ PAH	polycyklické aromatické uhlovodíky
PCA	analýza hlavních složek (Principal Component Analysis)
PCB	polychlorované bifenyly
PCDD/F	polychlorované dibenzo-p-dioxiny a furany
PE	polyethylen
PET	polyethylentereftalát
PM	pevné prachové částice (particulate matter)
POP	persistentní organické polutanty
Rs	Babcockův index
S	síra
SO ₂	oxid siřičitý
SO ₃	oxid sírový
Sr	index viskozity strusky
ST	sférická teplota
TA	celkové alkálie
TEQ	toxický ekvivalent v přepočtu na toxicitu kongenerů
TG	termogravimetrická metoda
TOC	celkový organický uhlík (total organic carbon)
TZL	tuhé znečišťující látky (prach), celkový prach bez rozlišení velikosti částic
W	voda v palivu
WHO	Světová zdravotnická organizace (World Health Organization)

11. Seznam grafů

Graf 1 Srovnání prvkového složení hořlaviny různých paliv včetně jejich výhřevností.....	5
Graf 2 Závislost výhřevnosti a spalného tepla dřeva na jeho vlhkosti	6
Graf 3 Porovnání hodnot výhřevností a spalných tepel různých paliv.....	9
Graf 4 Vliv přebytku spalovacího vzduchu na účinnost a kvalitu spalování	12
Graf 5 Orientační závislost účinnosti spalovacího zařízení na jeho těsnosti a teplotě spalin	20
Graf 6 Bilance emisí tuhých znečišťujících látek (TZL) v ČR pro rok 2015 dle ČHMÚ	23
Graf 7 Časový průběh produkce CO	32
Graf 8 Časový průběh produkce NO _x	33
Graf 9 Produkce PM	33
Graf 10 Emisní faktor pro CO.....	38
Graf 11 Emisní faktor OGC	38
Graf 12 emisní faktor PM _{2,5} měřený na cykloně.....	39
Graf 13 poměr PM _{2,5} a PM ₁₀ v cykloně	40
Graf 14 Zastoupení PM _{0,1} ; PM ₁ ; PM _{2,5} a PM ₁₀ s DLPI.....	41
Graf 15 Křivka sušení vzorku	48
Graf 16 Průběh emisí CO, TOC, NO _x při O _{2ref} = 13 % a koncentrace O ₂ ve spalinách při spalovacích zkouškách na křbových kamnech Romotop KK112D/AKU	50
Graf 17 Průběh emisí CO, TOC, NO _x při O _{2ref} = 13% a koncentrace O ₂ ve spalinách při spalovacích zkouškách v křbových kamnech Storch Estelli Keramik	52
Graf 18 Průběh tepelného rozkladu bukového listí	56
Graf 19 Položkový profil 16 PAH v emisích (BL – buková polena; BL-PET – buková polena a PET láhve; BL-PE – buková polena a plastové nákupní sáčky)	63
Graf 20 Výběr 135 TPB, neznámých izometrických sloučenin a doprovázejících PAU při spoluspalování PET	64
Graf 21 PCA vizualizované výsledky spalovacích experimentů s PET.....	64
Graf 22 Teplota deformace v oxidační a redukční atmosféře pro popel z biomasy a uhlí.....	70
Graf 23 Obsah hlavních prvků a chloridů v popelu z biomasy připravené při teplotě 550°C	72
Graf 24 Obsah hlavních prvků a chloridů v popelu z biomasy připravené při teplotě 815°C a 975°C..	72
Graf 25 Indexy strusky a zanášení pro popel z biomasy připravený při 550°C.....	76
Graf 26 Indexy strusky a zanášení pro biomasu a uhelný popel připravené při 815°C a 975°C.....	76

12. Seznam obrázků

Obrázek 1 Schématické zobrazení vlivu sušení dřeva na výhřevnost	7
Obrázek 2 Schématické zobrazení procesu hoření paliva – uhlíku	17
Obrázek 3 Schématicky vyjádřená bilance spalování suchého dřeva v krbových kamnech	21
Obrázek 4 Schéma spalovacích zařízení (zleva): prohořivací, odhořivací, automatický a zplyňovací kotel, krbová kamna	25
Obrázek 5 Krb o jmenovitém výkonu 6 kW	31
Obrázek 6 Dřevěné pelety	44
Obrázek 7 Ukázka briket ze vzorku listí kaštan	48
Obrázek 8 Brikety staženy drátem v krbových kamnech Romotop KK112D/AKU	50
Obrázek 9 Briketa z bukového listí	54

13. Seznam tabulek

Tabulka 1 Orientační stanovení příkonu z hodinové spotřeby dřeva	21
Tabulka 2 Porovnání stanovených emisních faktorů	24
Tabulka 3 Roční produkce prachu při vytápění rodinného domu různými palivy dle spalovacího zařízení	24
Tabulka 4 Odhad zastoupení typů spalovacích zařízení v ČR pro lokální vytápění dle konstrukce	24
Tabulka 5 Měrné emise sumy 4 polyaromatických uhlovodíků (PAU) v g/t paliva	26
Tabulka 6 Měrné emise PCDD/F v $\mu\text{gTEQ/t}$	26
Tabulka 7 Hrubý a elementární rozbor surového paliva	28
Tabulka 8 Emisní faktory CO, TZL a PAU	29
Tabulka 9 Emise PeCBz a HxCBz	30
Tabulka 10 Emisní faktory I-TEQ PCB a PCDD/F	30
Tabulka 11 Výhřevnost a vlhkost použitých druhů dřeva	32
Tabulka 12 Specifikace použitých paliv	35
Tabulka 13 Shrnutí základních parametrů při spalovacích zkouškách	36
Tabulka 14 Emisní faktor pro $\text{PM}_{2,5}$ a PM_{10} s cyklonou a DLPI	42
Tabulka 15 Měrné emise CO_2 vybraných tradičních a alternativních paliv	45
Tabulka 16 Spalné teplo, výhřevnost, obsah popela a prchavé hořlaviny vysušených vzorků	48
Tabulka 17 Výsledky spalovacích zkoušek v krbových kamnech Romotop KK 112D/AKU	49
Tabulka 18 Výsledky spalovacích zkoušek v krbových kamnech Storch Estelli Keramik	51
Tabulka 19 Emisní faktor jednotlivých frakcí	52
Tabulka 20 Proces změn vodní frakce v listech před drcením	53
Tabulka 21 Výsledky přibližných a konečných analýz listů buku v různých stavech.	54
Tabulka 22 Teplotní rozsahy tepelného rozkladu hemicelulózy, celulózy a ligninu	55
Tabulka 23 Výsledky spalovacích zkoušek	57
Tabulka 24 Základní složení a hlavní charakteristiky testovaného paliva	59
Tabulka 25 Shrnutí provedených spalovacích experimentů	60
Tabulka 26 Emisní faktory a hlavní charakteristiky spalovacích experimentů	60
Tabulka 27 Indexy struskování a zanášení	66
Tabulka 28 Označení vzorků paliv a teploty přípravy popela	68
Tabulka 29 Stanovení teploty spalování popela	69
Tabulka 30 Koncentrace hlavních složek a chloridů v popelu	71
Tabulka 31 Index struskování a znečištění pro vybrané druhy popela	74
Tabulka 32 Index tavitelnosti popela (AFI) a teplota deformace (DT) pro vybrané popeloviny	75

14. Zdroje informací

- [1] HORÁK, Jiří, KUBESA, Petr. *O spalování tuhých paliv v lokálních topeništích (1) aneb palivo, tvorba znečišťujících látek a spalování jako vztah muže a ženy*. 2012. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/8618-o-spalovani-tuhych-paliv-v-lokalnich-topenistich-1>
- [2] HORÁK, Jiří, KUBESA, Petr. *O spalování tuhých paliv v lokálních topeništích (2) aneb palivo, tvorba znečišťujících látek a spalování jako vztah muže a ženy*. 2012. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/8644-o-spalovani-tuhych-paliv-v-lokalnich-topenistich-2>
- [3] ČSN EN 303-5 Kotle pro ústřední vytápění – Část 5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ručním nebo samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 300 kW – Terminologie, požadavky, zkoušení a značení.
- [4] Nařízení Komise EU č. 2015/1189, kterým se provádí směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/125/ES, pokud jde o požadavky na ekodesign kotlů na tuhá paliva
- [5] Horak, J.: Kotlíkgate Opravdu nové kotle pořízené z dotace budou produkovat méně emisí znečišťujících látek?
- [6] Horák, Jiří, Hopan, František, Šyc, Michal, Machálek, Pavel, Krpec, Kamil, Ocelka, Tomáš, Tomšej, Tomáš. Bilance znečišťujících látek z malých zdrojů znečišťování se zaměřením na spalování tuhých paliv. *Chemické listy*. 2011, 105, 851-855. ISSN 1213-7103 (on-line), 0009-2770 (tištěné)
- [7] Machálek P., Machart J.: Emisní bilance vytápění bytů malými zdroji od roku 2001. ČHMÚ, Milevsko 2003. http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/oez/embil/metodika_rezzo3.pdf
- [8] Hopan F.: Dizertační práce. VŠB TUO, Ostrava 2010.
- [9] Paradiž B., Dilara P., Horák J., De Santi G., Christoph E. H., Umlauf G.: *Chemosphere* 73 (1 SUPPL.), S94 (2008)
- [10] Prevedouros K., Brorström-Lundén E., Halsall C.J., Jones K.C., Lee R.G.M., Sweetman A.J.: Seasonal and long-term trends in atmospheric PAU concentrations: evidence and implications, *Environ. Pollut.* 128, (2004), 17.
- [11] Breivik K., Vestreng V., Rozovskaya O., Pacyna J. M.: Atmospheric emissions of some POPs in Europe: a discussion of existing inventories and data needs, *Environ. Sci. Policy*. 9, (2006), 663.
- [12] Quaß U., Fermann M., Bröker G.: The European Dioxin Air Emission Inventory Project—Final Results. *Chemosphere* 54, (2004), 1319.
- [13] Junninen H., Mønster J., Rey M., Cancelinha J., Douglas K., Duane M. etc.: Quantifying the Impact of Residential Heating on the Urban Air Quality in a Typical European Coal Combustion Region, *Environ. Sci. Technol.* 43, (2009), 7964.
- [14] Lavric E. D., Konnov A. A., De Ruyck J.: Dioxin levels in wood combustion—A review, *Biomass and Bioenergy* 26, (2004), 115.
- [15] Hedman B., Naslund M., Marklund S.: Emission of PCDD/F, PCB, and HCB from Combustion of Firewood and Pellets in Residential Stoves and Boilers, *Environ. Sci. Technol.* 40, (2006), 4968.
- [16] Šyc M., Horák J., Krpec K., Hopan F., Dej M., Ocelka T., Tomšej T.: Effect of Non-stationary Combustion Phases on Emission Factors of Selected Pollutants and PCDD/F from Domestic Combustion, *Organohalogen Compounds* 72, (2010), 356.
- [17] Pekárek V., Punčochář M., Bureš M., Grabic R., Fišerová E.: Effects of sulfur dioxide, hydrogen peroxide and sulfuric acid on the de novo synthesis of PCDD/F and PCB under model laboratory conditions, *Chemosphere* 66, (2007), 1947.

- [18] Horák J., Hopan F., Krpec K., Dej M., Machálek P., Pekárek V., Šyc M., Ocelka T., Tomšej T.: Emise POP a těžkých kovů z malých zdrojů znečišťování a jejich emisní faktory, *Ochrana ovzduší* 21(56), (2008), 38.
- [19] Kinsey J. S., Kariher P. H., Dong Y.: Evaluation of methods for the physical characterization of the fine particle emissions from two residential wood combustion appliances, *Atmospheric Environment* 43, (2009), 4959.
- [20] Machniková E., Koutsky M., Hrdlička F., Vosta J.: *Chem. Listy* 97, 171 (2003).
- [21] Horák J., Kubesa P.: TZB-info 2012,1. <http://www.energetika.tzb-info.cz/8618-o-spalovani-tuhychpaliv-v-lokalnich-topenistich-1>
- [22] Noskijevič P., Juchelková D.: *Biomasa a její energetické využití*. Ministerstvo životního prostředí ČR, Praha 1996.
- [23] Niu J., Rasmussen P. E., Hassan N. M., Vincent R.: *Water, Air, Soil Pollut.* 213, 211 (2010).
- [24] <http://link.springer.com/10.1007/s11270-010-0379-z>
- [25] Šyc, M.; Horák, J.; Hopan, F.; Krpec, K. SROVNÁNÍ EMISÍ VYBRANÝCH ZNEČIŠŤUJÍCÍCH LÁTEK ZE SPALOVÁNÍ BIOMASY A UHLÍ V DOMÁCNOSTECH. 2011. *Paliva* 3. 64-68
- [26] ČSN EN 13240/A2: Spotřebiče na pevná paliva k vytápění obytných prostorů – Požadavky a zkušební metody. Kapitola 6 – Požadavky na provozní vlastnosti (únor 2002).
- [27] Vereinbarung gemäß Art. 15a B-VG über das Inverkehrbringen von Kleinfeuerungen und die Überprüfung von Feuerungsanlagen und Blockheizkraftwerken. 2011.
- [28] Wang C., Seames W. S., Gadgil M., Hrdlička J., Fix G.: *Aerosol Sci. Technol.* 2007, 1049.
- [29] <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02786820701697788>.
- [30] European Environment Agency. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/air-emissions-viewer-lrtap>
- [31] European Environment Agency. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/air-emissions-viewer-lrtap>
- [32] Garcia-Maraver, A., Mata-Sanchez, J., Carpio, M. & Perez-Jimenez, J.A. (2017). Critical review of predictive coefficients for biomass ash deposition tendency. *J. Energy Inst.* 90, 214–228. DOI: doi.org/10.1016/j.joei.2016.02.002.
- [33] Vamvuka, D. & Kakaras, E. (2011). Ash properties and environmental impact of various biomass and coal fuels and their blends. *Fuel Process Technol.* 92, 570–581. DOI: doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.11.013.
- [34] Pronobis, M., Kalisz, S. & Polok, M. (2013). The impact of coal characteristics on the fouling of stoker-fired boiler convection surfaces. *Fuel.* 112, 473–482. DOI: doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.044.
- [35] Yao, X., Xu, K., Yan, F. & Yu, L. (2017). The influence of ashing temperature on ash fouling and slagging characteristics during combustion of biomass fuels. *Bioresources.* 12(1), 1593–1610.
- [36] Yao, X., Xu, K. & Li, Y. (2017). Experimental investigation of performance properties and agglomeration behavior of fly ash from gasification of corncobs. *J. Cent. South. Univ.* 24, 496–505. DOI: doi.org/10.1007/s11771-017-3452-6.
- [37] Yao, X., Xu, K. & Yan, F. (2016). Comparative study of characterization and utilization of corncob ashes from gasification process and combustion process. *Constr. Build. Mater.* 119, 215–222. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.077.
- [38] Du, S., Yang, H., Qian, K., Wang, X. & Chen, H. (2014). Fusion and transformation properties of the inorganic components in biomass ashes. *Fuel.* 117, 1281–1287. DOI: doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.085.

- [39] Prog. Energy Combust. Sci. Ash-related issues during biomass combustion: Alkali-induced slagging, silicate melt-induced slagging (ash fusion), agglomeration, corrosion, ash utilization, and related countermeasures. 52, 1–61. DOI: doi.org/10.1016/j.pecs.2015.09.003.
- [40] Liu, B., He, Q., Jiang, Z., Xu, R. & Hu, B. (2013). Relationship between coal ash composition and ash fusion temperatures. *Fuel*. 105, 293–300. DOI: doi.org/10.1016/j.fuel.2012.06.046.
- [41] Vassilev, S.V., Vassileva, C.G., Song, Y.C., Li, W.Y. & Feng, J. (2017). Ash contents and ash-forming elements of biomass and their significance for solid biofuel combustion. *Fuel*. 208, 377–409. DOI: doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.036.
- [42] Magdziarz, A., Dalai, A.K. & Kozinski, J.A. (2016). Chemical composition, character and reactivity of renewable fuel ashes. *Fuel*. 176, 135–145. DOI: doi.org/10.1016/j.fuel.2016.02.069.
- [43] Orfao, J.J.M., Antunes, F.J.A. & Figueiredo, J.L., Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials-three independent reactions model. *Fuel*, 78, pp. 349–358, 1999.
- [44] Van Loo, S. & Koppejan, J., (eds), *Biomass Combustion & Co-firing*, Earthscan:London, 2008.
- [45] Parathasarathy, P. & Narayanan, S.K., Determination of kinetic parameters of biomass samples using thermogravimetric analysis. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 33, pp. 256–266, 2014.
- [46] Chandrasekaran, A., Sethumadhavan, R. & Senthilmurugan, S., Determination of kinetic parameters in the pyrolysis operation and thermal behavior of *Prosopis juliflora* using thermogravimetric analysis. *Bioresource Technology*, 233, pp. 413–422, 2017.
- [47] Sun, Z. et al., Thermogravimetric and kinetics investigation of pine wood pyrolysis catalyzed with alkali-treated CaO/ZSM-5. *Energy Conversion and Management*, 146, pp. 182–194, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.104>.
- [48] Gu, L. et al., Persulfate oxidation assisted hydrochar production from *Platanus Orientalis* leaves: Physicochemical and combustion characteristics. *Bioresource Technology*, 244, pp. 517–524, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.173>.
- [49] Long, Y. et al., TG-FTIR analysis of pyrolusite reduction by major biomass components. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 23, pp. 1691–1697, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2015.08.028>.
- [50] Garcia-Maraver, A., Salvachúa, D., Martínez, M.J., Diaz, L.F. & Zamorano, M., Analysis of the relation between the cellulose, hemicellulose and lignin content and the thermal behavior of residual biomass from olive trees. *Waste Management*, 33, pp. 2245–2249, 2013.
- [51] Mishra, R.K. & Mohanty, K., Pyrolysis kinetics and thermal behavior of waste sawdust biomass using thermogravimetric analysis. *Bioresource Technology*, 251, pp. 63–74, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.029>.
- [52] Yao, X., Kaili, X., Fang, Y. & Liang, Y., The influence of ashing temperature on ash fouling and slagging characteristics during combustion of biomass fuels. *Bioresources*, 12, pp. 1593–1610, 2017. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.12.1.1593-1610>.
- [53] Kim, K. H.; Jahan, S. A.; Kabir, E.; Brown, R. J. C. A review of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their human health effects. *Environ. Int.* 2013, 60, 71–80.
- [54] Jalava, P.; Salonen, R.; Hälinen, A.; Penttinen, P.; Pennanen, A.; Sillanpää, M.; Sandell, E.; Hillamo, R.; Hirvonen, M. In-vitro inflammatory and cytotoxic effects of size segregated particulate samples collected during long-range transport of wildfire smoke to Helsinki. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 2006, 215, 341–353.
- [55] Kupiainen, K.; Klimont, Z. Primary Emissions of Submicron and Carbonaceous Particles in Europe and the Potential for their Control. Interim Report R-04-079; IIASA: Laxenburg, Austria, 2004; <http://webarchive.iiasa.ac.at/rains/reports/ir-04-079.pdf> (accessed October 21, 2015).

- [56] Leskinen, J.; Tissari, J.; Uski, O.; Virén, A.; Torvela, T.; Kaivosoja, T.; Lamberg, H.; Nuutinen, I.; Kettunen, T.; Joutsensaari, J.; Jalava, P.; Sippula, O.; Hirvonen, M.; Jokiniemi, J. Fine particle emissions in three different combustion conditions of a wood chipfired appliance – Particulate physico-chemical properties and induced cell death. *Atmos. Environ.* 2014, 86, 129–139.
- [57] Drastichová, V.; Martiník, L.; Horák, J.; Krpec, K.; Hopan, F.; Kubesa, P. Emissions of Nanoparticles from Small Combustion Equipment with Regard to the Combustion Mode and Wood Humidity. *Adv. Mater. Res.* 2014, 1041, 230–234.
- [58] Ryšavý, J.; Horák, J.; Kuboňová, L.; Jaroš, M.; Hopan, F.; Krpec, K.; Kubesa, P. BEECH LEAVES BRIQUETTES AS FUEL FOR A HOME COMBUSTION UNIT. 2021. *Energy Production and Management in the 21st Century IV.* 75-85

Autoři:	Ing. Jan Koloničný, Ph.D. Ing. Petr Kubesa Ing. Radomíra Pánková Ing. Oleksandr Molchanov, Ph.D. Ing. Silvie Petránková Ševčíková, Ph.D. doc. Ing. Michal Holubčík, PhD.
Katedra, institut:	Centrum energetických a environmentálních technologií Výzkumné energetické centrum Inovace pro efektivitu a životní prostředí
Název:	Paliva a jejich vlastnosti
Místo, rok vydání:	Ostrava, 2022, 1. vydání
Počet stran:	86
Vydala:	Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Tisk:	MORAVAPRESS s.r.o.
Náklad:	150 ks
Neprodejné	

Tato kniha obsahuje výběr z článků, které publikovali pracovníci zkušebny Výzkumného energetického centra – VŠB TU Ostrava na portálu www.tzb-info.cz a v odborném časopise Vytápění, větrání, instalace.

Za obsah publikace jsou odpovědní autoři. Informace zde uvedené nejsou oficiálním stanoviskem orgánů Evropské unie.

ISBN 978-80-248-4624-8

ISBN 978-80-248-4624-8