

SPALOVÁNÍ BIOMASY V KRBOVÝCH KAMNECH – ÚČINNOST A EMISE**EVA MACHNÍKOVÁ^a, MARTIN KOUTSKÝ^a,
FRANTIŠEK HRDLÍČKA^b a JAN VOŠTA^a***^aÚstav energetiky, Vysoká škola chemicko-technologická, Technická 5, 166 28, Praha 6, ^bÚstav mechaniky tekutin a energetiky, České vysoké učení technické, Žitkova 4, 166 36 Praha 6**e-mail: eva.machnikova@vscht.cz*

Došlo 6.1.02, přepracováno 28.6.02, přijato 12.8.02.

Klíčová slova: biomasa, spalování, emise

Obsah

1. Úvod
2. Základní pojmy
3. Vznik emisí
4. Experimentální část
 - 4.1. Použité palivo
 - 4.2. Spalovací zařízení
 - 4.3. Průběh měření
 - 4.4. Analytické a měřicí metody
5. Stanovení bilancí
6. Výsledky a diskuse
 - 6.1. Průběh spalování
 - 6.2. Vlastnosti paliv
 - 6.3. Spaliny
 - 6.4. Nedopal
 - 6.5. Hmotnostní a entalpické bilance
7. Závěr

1. Úvod

Energetickému využití biomasy je věnována mimořádná pozornost ve všech vyspělých zemích světa a ani Česká republika není výjimkou. Výrazně je podporován výzkum zaměřený na zvýšení efektivity využití biomasy a rozšíření možností jejího uplatnění. Omezené zásoby fosilních paliv vedou k hledání dalších přírodních zdrojů, aby i nadále bylo možné zajišťovat strmě narůstající trend spotřeby energie. V podmínkách České republiky je místním klíčovým zdrojem obnovitelné energie právě biomasa, která umožňuje řešit problémy regionálního rozvoje (vytváření pracovních příležitostí, využití ladem ležící půdy¹) a má proti fosilním palivům i řadu ekologických výhod. Vyrovnává disharmonii obsahu CO₂ v ovzduší jeho spotřebou při jejich růstu. Nízký obsah síry zaručuje minimální emise oxidů síry. Naopak problémovým je obsah chloru, který má za následek vznik chlorovaných organických látek (organochlorové pesticidy, polychlorované bifenyly – PCB, polychlorované dibenzodioxiny a dibenzofurany – PCDD/F). Z nechlorovaných škodlivin jsou to polycyklické aromatické

uhlovodíky – PAH (cit.²). Je proto nutné poznat mechanismy a zákony spalovacích procesů a v maximální míře je uplatňovat. Nezodpovědné a laické provozování spalovacích zařízení může mít i v případě biomasy za následek výrazné překročení emisních limitů pro některé škodliviny³. energii z biomasy lze získávat různými způsoby termochemické, biochemické a chemické přeměny. Podle podílu na produkci energie pochází více než 70 % energie z obnovitelných zdrojů ze spalovacích procesů⁴ ve speciálních kotlích různé konstrukce a velikosti. V poslední době je pozornost zaměřena na spalování biomasy ve fluidních kotlích⁵ a na její zplyňování.

Cílem této práce je sledování a porovnání hmotnostní a entalpické bilance při spalování různých druhů biomasy v lokálním topeništi (krbová kamna Peletop 5.1). Dále pak posouzení naměřených emisí jak klasických, tak problematických organických škodlivin.

Práce je součástí projektu Ministerstva životního prostředí VaV 320/3/99 „Zdokonalování stávajících technologií využitím obnovitelných zdrojů a úspor energie“, etapa 02–01: Studium hmotnostních, energetických a kontaminačních toků při spalování biomasy.

2. Základní pojmy**B i o m a s a**

Biomasa je hmota rostlinného nebo živočišného původu, která je získávána cílenou výrobní zemědělskou a lesnickou činností nebo jako vedlejší produkt či odpad z jiných výrobních činností. Biomasa rostlinného původu lze dělit na dvě hlavní skupiny:

- vedlejší a odpadní produkty např. z lesní těžby (dřevní štěpka, kůra), z dřevozpracujícího průmyslu (piliny, hobliny, odřezky), ze zemědělské výroby (obilná, kukuřičná a řepková sláma), komunální (z údržby zeleně), z potravinářské výroby (z lihovarů, cukrovarů),
- cíleně pěstované energetické rostliny nebo rychle rostoucí dřeviny např. energetické plodiny (řepka, konopí, kostřava), rychle rostoucí energetické dřeviny (vrba, topol, olše).

Dřevní hmoty lze využívat jako tradiční polínka nebo jiné kusové odpady. V této práci byl využit dřevní odpad upravený do pelet o určité velikosti přizpůsobené parametrům krbových kamen Peletop 5.1. Možnosti využití dřevní hmoty jsou dány jejími fyzikálními vlastnostmi (spalné teplo, výhřevnost), na nichž závisí chování paliva při vlastním hoření i při jeho použití pro příslušné výrobní procesy z hlediska tepelného výkonu a technologie ohřevu, a vlastnostmi chemickými (obsahy uhlíku, dusíku, vodíku, kyslíku, síry, vlhkosti, popela, hořlaviny a prchavé hořlaviny) majícími přímý vliv na výhřevnost, způsob a průběh spalování. Základem dřevních odpadů je organická dřevní hmota, kterou tvoří zdřevnatělé stěny buněk, jejichž chemickou podstatou je celuloza. Vnitřní obsah buněk tvoří bílkoviny, škrob, sacharidy, tuky, třísloviny, pryskyřice, rostlinná barviva a malé procento anorganických (nespalitelných) látek⁶. Pro dřevo je specifické, že mezi tuhými palivy obsahuje nejvyšší podíl pyrolýzou uvolňovaných látek (75–85 %) nehořících na roštu, ale ve vznosu mezi rostem a komínem („dlouhý plamen“ dřeva), a že má velmi nízký obsah síry a popela⁷.

Spalovací proces

Spalovací proces je rychlá oxidace paliva, při které se uvolňuje tepelná energie. Rychlá oxidace je možná po zajištění dvou základních podmínek⁸:

- palivo musí být v dobrém styku s oxidovadlem,
- směs paliva a oxidačního činidla musí být zahřátá na zápalnou teplotu.

Spalovací proces dřeva probíhá ve čtyřech hlavních fázích:

- sušení a odpařování vody z paliva,
- pyrolýza a uvolňování plynné složky paliva,
- spalování plynné složky paliva,
- spalování tuhých látek, zejména uhlíku.

Skutečně efektivní a pro životní prostředí neškodné spalování dřeva je možné pouze ve speciálně řešených topeništích a nikoliv v energetických jednotkách konstruovaných pro jiná paliva (uhlí, koks). Při spalování dřeva velmi záleží na formě spalovaného dřeva (špalvy, polena, odřezky, štěpka, drf, piliny atd.) a na potřebném výkonu kotle⁹. Lokální spotřebiče na spalování dřeva a dřevního odpadu jsou v současné době v období mimořádného rozvoje díky krbům a krbovým kamnům. Krby, vyvolávající pocit pohody, jsou dnes nahrazovány moderně řešenými topeništi s prosklenou přední stěnou a dobře vyřešenou regulací množství spalovacího vzduchu. Řešení teplosměnných ploch, rozdělení spalovacího vzduchu na primární, přivedený pod rošt, a sekundární, zavedený přímo do horní části ohniště, a použití kvalitních materiálů, umožnilo výrazné zvýšení účinnosti při zachování většiny předností otevřených ohnišť. Je pozoruhodné, jakého pokroku bylo díky snaze využívat levný a obnovitelný zdroj v krátké době dosaženo, a do budoucna lze očekávat intenzivní rozšíření jejich používání stejně, jako je tomu v zemích západní Evropy, zejména i ve Skandinávii¹⁰.

3. Vznik emisí

Jednou z nejvýznamnějších příčin znečištění ovzduší v České republice je již dlouhodobě spalování fosilních paliv ve stacionárních spalovacích zařízeních při výrobě elektrické energie a tepla. Tato výroba je provázena emisemi oxidů síry, oxidů dusíku, tuhých znečišťujících látek obsahujících i stopové prvky (např. těžké kovy), dále emisemi těkavých organických látek a řady dalších organických a anorganických látek, které znečišťují ovzduší¹¹. Složení spalin je závislé na složení paliv a na spalovacích podmínkách, tj. na spalovací teplotě a přebytku vzduchu. Teprve spalováním při teplotě vyšší než 760 °C se tvoří plyny bez zápachu, při teplotě nad 830 °C převládá reakce: $2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$.

Uhlovodíky se oxidují nejprve na CO, přičemž doba reakce je oproti době další oxidace na CO₂ zanedbatelná. Při obsahu kyslíku mezi 6–16 % a při teplotě nejméně 800 °C klesne obsah CO na 200 ppm a obsah spalitelných organických sloučenin na 100 ppm (cit.¹²). Při nízkém přebytku vzduchu vznikají v některých částech spalovací komory oblasti bez kyslíku, ve spalinách jsou pak nespálené uhlovodíky. Obecně je přítomnost nespálených uhlovodíků následkem lokálního zhášení plamene¹³.

Z hlediska obsahu CO ve spalinách je také zajímavý vliv vlhkosti paliva. V případě suchého dřeva je minimalizována fáze odpařování vody, zapálení paliva probíhá velmi rychle

a hořlavé složky nestačí vyhořet. U mokrého dřeva je díky odpařovací fázi proces zapálení pozvolný a obsah CO je výrazně nižší a vyrovnaný³.

Emisím CO nelze úplně zabránit, ale lze je snížit vhodnou úpravou spalovacího zařízení a režimu spalovacího procesu.

Při spalování dřevních odpadů neunikají oxidy síry. Je to dáno minimálním obsahem síry v tomto odpadu.

Oxidy dusíku vznikají během spalování z dusíku obsaženém v palivu, ale také z dusíku, který obsahuje spalovací vzduch. Při procesu spalování vzniká především NO, obvykle více než 95 %, který se v atmosféře oxiduje na NO₂. V současné době jsou známy čtyři mechanismy vedoucí ke vzniku NO_x:

- tepelný NO – vzniká za velmi vysokých teplot,
- promptní NO – tvoří se z radikálů CH reagujících se vzdušným N₂ za vzniku HCN, který dále reaguje na NO,
- NO vznikající z N₂O za přítomnosti třetí molekuly,
- vznik NO z palivového dusíku.

Tvorbu oxidů dusíku můžeme snížit zejména typem spalovacího zařízení a tvarem spalovací komory.

Uhlovodíky a saze jsou prekurzory vzniku NO_x. Porozumění procesům, které vedou ke vzniku těkavých organických látek a sazí, je jedním ze základních úkolů současné ochrany ovzduší. Při spalování fosilních paliv i biomasy jsou do ovzduší emitovány látky, které v přírodě nesnadno podléhají rozkladu nebo přeměně, perzistentní organické polutanty (POP). Hlavními zástupci POP jsou chlorované organické látky – organochlorové pesticidy, polychlorované bifenylly (PCB) a polychlorované dibenzodioxiny a dibenzofurany (PCDD/F).

Nejškodlivější karcinogenní PCDD/F jsou zastoupeny 2,3,7,8-tetrachlordibenzo-1,4-dioxinem a 2,3,7,8-tetrachlordibenzofuranem. Zdrojem volného chloru pro vznik organochlorových sloučenin při spalovacích reakcích mohou být i anorganické chloridy. Tento volný chlor reaguje s částicemi uhlíku přítomnými na popílku unášeném ve spalinách². Výrazné omezení vzniku PCDD/F při spalování vyžaduje provádět spalování odpadu při vysoké teplotě (nad 920 °C), s nízkým součinitelem přebytku vzduchu (pod 1,6), a to rovnoměrně s dokonalým promísením spalin a jejich setrvání při vysoké teplotě minimálně 2 s (cit.¹⁴). Vznikem vyšších uhlovodíků (produktů pyrolýzy) při spalování komunálních odpadů se například blíže zabývají v Institutu di Ricerca Sulle Acque v Itálii^{15,16}.

Z nechlorovaných škodlivin se mezi POP řadí těkavé organické sloučeniny (VOC), patří sem např. benzen, toluen, xyleny, také polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH), např. naftalen, fenantren, anthracen, pyren, benzo[a]pyren¹⁷. Poslední uvedený patří mezi nejškodlivější. Tyto škodliviny mohou být také karcinogenní. Uvedené sloučeniny vznikají především za přebytku paliva a jsou důležitými prekurzory vzniku sazí¹⁸.

Emise sazí reprezentují nejen palivové ztráty, ale jsou také nepříznivé pro životní prostředí¹⁹. Strukturu sazí lze těžko popsat. Neexistuje zde zřetelný přechod mezi tuhou, kapalnou a plynnou fází. Produkty, které vznikají, se vzájemně liší obsahem uhlíku a vodíku. Navzdory této různorodosti můžeme saze charakterizovat pomocí rozdílných molárních hmotností vzniklých částic. Právě vzniklé saze sestávají z polycyklických struktur s vedlejšími řetězci s poměrem vodíku k uhlíku zhruba 1. Stárnutí sazí způsobené ohříváním vede ke

vzniku částic s vyšším obsahem uhlíku, podobných grafitu¹⁸. Vysoké tlaky a teploty zvyšují množství vznikajících sazí. Saze mohou být z hlediska škodlivosti karcinogenní samy o sobě, nebo mohou být karcinogenní částice na nich adsorbované²⁰.

Při spalování tuhých paliv vznikají také prachové částice. Účinek těchto částic na organismus je závislý na složení, tvaru a velikosti. Částice, jejichž velikost je nad 100 μm , se většinou do dýchacích cest nedostanou. Menší bývají zachyceny. Jejich účinek je závislý na složení a rozpustnosti v tělních tekutinách a na biologické aktivitě. Podle svého složení a adsorbovaných látek může mít prach účinky dráždivé, toxické, fibrogenní a alergizující²⁰.

4. Experimentální část

4.1. Použité palivo

Palivem byly pelety vyrobené lisováním za vysokého tlaku bez přídavku pojiva o maximálním průměru 1 cm přizpůsobeném parametrům krbových kamen. Listnaté pelety o průměru 0,86 cm byly tvořeny pilinami z listnatých stromů včetně kůry. Směsné pelety o průměru 0,89 cm byly tvořeny pilinami z listnatých i jehličnatých stromů, ale bez kůry, proto byly světlejší a měkčí. „Americké pelety“ o průměru 0,67 cm byly neznámého složení dovezené ze Spojených států amerických. Posledním použitým palivem byly pelety z černouhelných kalů o průměru 0,70 cm.

Vzorky paliv byly číslovány takto:

- č. 1 – listnaté pelety – netříděné
- č. 2 – listnaté pelety – tříděné
- č. 3 – směsné pelety – netříděné
- č. 4 – směsné pelety – tříděné
- č. 5 – „americké pelety“
- č. 6 – pelety z černouhelných kalů

4.2. Spalovací zařízení

Krbová kamna Peletop 5.1 pro experiment dodal výrobce Ing. Kučera z firmy Bechyně, s.r.o. sídlící v Lánech. Kamna jsou představitelem nové generace lokálních spalovacích zařízení. Spalují speciálně vyrobené palivo, které svojí formou (lisované granule = pelety) umožňuje plně automatické dávkování šnekovým podavačem ze zásobníku do ohniště. Díky tomuto přesnému a plynulému dávkování je možno nastavit spalovací poměry. Ohniště tvoří velmi malý rošt (pod ním je umístěn popelník a nad ním výměník tepla). V zařízení jsou nainstalovány dva ventilátory s příkonem 47 W. Jeden je na odtahu spalin a druhý nasává studený vzduch z místnosti nebo z venkovního prostředí. Teplo uvolněné při spalování se odvádí ze spalovací komory nucenou konvekcí do vzduchu. V horní části kamen jsou dva termočlánky zamezující přehřátí kamen pozastavením dávkování paliva, proto je spalování diskontinuální. Na výstupu spalin je regulovatelná komínová klapka. Spaliny odcházejí komínovým odtahem o průměru 80 mm; díky nucenému odtahu se nevyžaduje přítomnost komínu. Na levé boční straně kamen je ovládací panel opatřený hlavním vypínačem, třemi světelnými kontrolkami (zelená, oranžová a červená) a vypínačem ventilátoru, který

umožňuje manipulaci v předním prostoru kamen. Schéma spalovacího zařízení je na obr. 1.

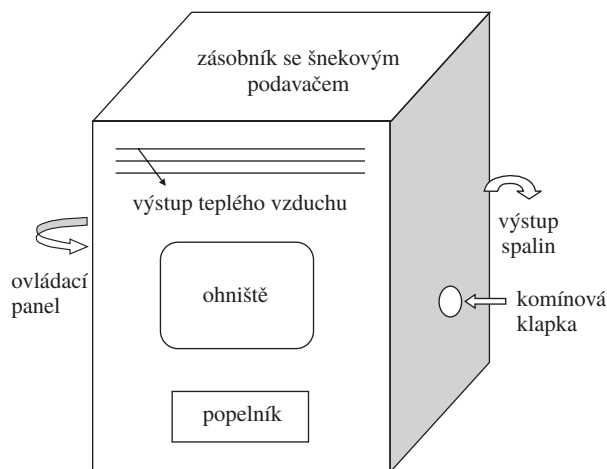
Technické parametry spalovacího zařízení (dodané výrobcem):

Tepelný výkon	5,25 kW
Tepelný výkon snížený	3,5 kW
Spotřeba paliva	0,99 kg.h ⁻¹
Spotřeba paliva – snížený výkon	0,66 kg.h ⁻¹
Výhřevnost paliva	18–20 MJ.kg ⁻¹
Obsah zásobníku paliva	24 kg
Doba pro vyhoření zásobníku	24–36 h
Teplota spalin ve výstupním hrdle	95–100 °C
Teplota na výstupu do místnosti	80–90 °C
Prívod vzduchu volitelný	z místnosti/zvenku
Hmotnost krbových kamen	85 kg
Rozměry kamen: výška	760 mm
šířka	620 mm
hloubka	530 mm
Elektrické připojení (běžná zásuvka)	230 V/125 VA

4.3. Průběh měření

Spalování v krbových kamnech Peletop bylo bez problémů. Obsluha zařízení byla jednoduchá a nenáročná. Palivo obsahovalo méně než 10 % vlhkosti, a proto zapalování probíhalo velmi dobře. Menší problémy byly se zapálením černouhelných kalů, které obsahovaly 30% vlhkosti. Navážené množství paliva bylo spáleno při ustáleném provozu krbových kamen, tzn. komínová klapka byla nastavena při všech měřeních stejně – otevřená z 1/4 (při úplném otevření komínové klapky dochází k vypnutí kamen). Během měření bylo regulováno pouze dávkování paliva šnekovým podavačem do ohniště označené hodnotami 1–6. Při spalování byly měřeny klasické emise (O_2 , CO_2 , CO , NO_x , NO , SO_2), tlak, teplota okolí, teplota spalin, přebytek vzduchu, komínová ztráta a účinnost spalování analyzátozem spalin Madurem GA-60. Při měření černouhelných kalů bylo nutno analyzátor spalin několikrát čistit od nanesených sazí a prachu.

Teplota ohřátého vzduchu byla měřena digitálním teploměrem. Relativní vlhkost vzduchu byla měřena vlhkoměrem. Při každém měření byl odebrán vzorek paliva a veškerý nedo-



Obr. 1. Schéma spalovacího zařízení

pal pro další stanovení. Listnaté a směsné pelety byly proměřeny dvojím způsobem, a to při nastavení dávkování na hodnotu 5 a při změně nastavení dávkování od 1 do 6. Navíc ještě byly proměřeny tříděné listnaté i směsné pelety s délkou větší než 1 cm kvůli porovnání množství nedopalu, respektive pro- padu. Americké pelety i černouhelné kaly byly spalovány při nastavení dávkování na hodnotu 5 pro výpočet entalpické bilance.

4.4. Analytické a měřicí metody

V palivu byl standardními analytickými metodami stanoven obsah vody (W), popela (A), hořlaviny (h) a prchavé hořlaviny (V). Stejnými metodami byl stanoven i nedopal. Kalorimetricky bylo stanoveno spalné teplo, z něhož pak byla dopočítána výhřevnost. Elementární stanovení obsahu C, N, H, S, Cl v palivu a nedopalu bylo provedeno v Centrálních laboratořích organické elementární analýzy. Obsah kyslíku byl dopočítán. Při nastavení dávkování na hodnotu 5 byly u paliv č. 2–6 změřeny také hodnoty C_xH_y Ing. Malechou, CSc., a Ing. Skobljou z Ústavu plynárenství, koksochemie a ochrany ovzduší; byly též naměřeny VOC zachycením do trubičky a PAH zachycením do acetonu. Pro doplnění byly pro běžně dostupné směsné pelety zjištěny emise PAH, PCB a PCDD/F Ing. Neubauerovou z firmy Axis Varilab spol. s r.o.

5. Stanovení bilancí

Základní schéma pro stanovení hmotnostních a entalpických bilancí:

Vstupy: palivo (pal)
suchý vzduch (vzd)
vlhkost vzduchu (H_2O_{vzd})
studený vzduch

Výstupy: suché spaliny (spal)
vlhkost spalin (H_2O_{spal})
nedopal (ned)
teplý vzduch

Pro výpočet bilancí byly použity níže uvedené veličiny

Tabulka I
Údaje o průběhu spalování (číslo paliva viz kap. 4.1.)

Podmínky spalování	1	2	3	4	5	6
Množství paliva, kg	4,00	5,00	3,50	4,00	1,75	3,00
nedopalu, %	0,99	0,88	0,73	0,50	0,54	18,00
Doba spalování, min	210	240	165	210	100	210
Spotřeba paliva, $kg \cdot h^{-1}$	1,14	1,25	1,27	1,14	1,03	0,86
Teplota vzduchu, °C	23,1	19,0	19,4	19,0	18,0	22,5
ohřátého vzduchu, °C	135,0	151,0	146,5	162,0	158,0	120,5
spalin, °C	182,1	205,7	193,9	221,2	229,3	168,3
Tlak, hPa	0,19	0,13	0,12	0,13	0,09	0,18
Přebytek vzduchu, %	3,6	4,5	6,4	3,3	3,9	6,5
Komínová ztráta, %	19,2	25,2	37,2	21,9	27,3	33,7
Účinnost spalování, %	80,8	74,8	62,8	78,1	72,7	66,3
Relativní vlhkost vzduchu, %	41	42	44	42	44	36

(v následujícím přehledu jsou uvedena i příslušná měřicí zařízení a jejich přesnost):

hmotnost – analytické váhy, $\pm 0,0002$ g / kupecké váhy pro stanovení hmotnosti paliva, ± 1 g
teplota spalin a vzduchu – analyzátor spalin Madur GA-60, ± 1 °C
teplota ohřátého vzduchu – digitální teploměr, $\pm 0,1$ °C
tlak – analyzátor spalin Madur GA-60, $\pm 0,01$ hPa
relativní vlhkost – vlhkoměr, ± 1 %
spalné teplo – kalorimetr KL-6, $\pm 0,001$ °C
elementární stanovení – uhlík, vodík, dusík CHN analyzátor Perkin-Elmer 2400, $\pm 0,01$ % / síra titračně pomocí $Ba(ClO_4)_2$ na indikátor Thorin, $\pm 0,01$ % / chlor titračně pomocí $AgNO_3$, $\pm 0,01$ % / kyslík se dopočítává
spaliny – analyzátor spalin Madur GA-60: O_2 s elektrochemickou celou, $\pm 0,01$ % / CO_2 přepočítáván, $\pm 0,01$ % / CO , NO , NO_2 , SO_2 , s elektrochemickou celou, ± 1 ppm (obj.).

6. Výsledky a diskuse

6.1. Průběh spalování

Základní hmotnostní, teplotní a časový průběh spalování je zaznamenán v tabulce I.

Z tabulky je patrné, že u pelet z dřevních odpadů je velmi nízké procento nedopalu oproti peletám z černouhelných kalů. Hodinová spotřeba paliva je však u paliv č. 1–5 vyšší než u paliva č. 6, je to dáno vlhkostí paliva, obsahem prchavé hořlaviny a obsahem popela.

Teplota ohřátého vzduchu měřená přímo na výstupu z výměníku je zhruba o 50 °C nižší než teplota spalin. Teplota spalin je však velmi nízká, z čehož vyplývá nedokonalost spalování a vysoké koncentrace produktů nedokonalého spalování (CO a vyšších uhlovodíků). Vysoký přebytek vzduchu je dán netěsnostmi spalovacího zařízení.

6.2. Vlastnosti paliv

Výsledky analýz paliv a příslušná spalná tepla a výhřevnosti jsou v tabulce II.

Tabulka II

Chemické a fyzikální vlastnosti paliv (číslo paliva viz kap. 4.1.)

Palivo č.	C [%]	H [%]	N [%]	S [%]	O [%]	A [%]	W [%]	V [%]	Q _s [MJ.kg ⁻¹]	Q _i [MJ.kg ⁻¹]
1	49,15	5,42	0,08	0,15	36,30	0,81	8,09	85,25	18,53	17,14
2	47,93	5,34	0,07	0,15	37,62	0,83	8,06	85,32	18,67	17,30
3	49,50	5,45	0,06	0,03	38,74	0,31	5,91	84,99	20,16	18,82
4	46,84	5,85	0,00	0,06	39,12	0,32	7,81	86,21	19,09	17,61
5	44,47	4,36	0,04	0,04	43,04	0,30	7,75	86,33	19,10	17,95
6	47,56	2,04	0,73	0,19	6,80	14,69	27,99	45,11	19,46	18,33

Tabulka III

Naměřené koncentrace plynných emisí na výstupu z krbových kamen (číslo paliva viz kap. 4.1.)

Palivo č.	O ₂ [obj.%]	CO ₂ [obj.%]	C [ppm]	NO _x [ppm]	C _x H _y [ppm]	CO [mg.m ⁻³]	NO [mg.m ⁻³]	NO _x [mg.m ⁻³]	VOC [μg.m ⁻³]	PAH [μg.m ⁻³]
1	14,8	5,7	1594,0	65,3	–	1967,4	129,2	193,1	–	–
2	15,4	5,2	1681,0	142,1	352,6	2578,7	186,0	284,1	1428,0	129,0
3	17,6	3,1	2055,4	46,5	224,2	2536,8	62,9	93,8	5398,0	671,0
4	14,3	6,1	1394,2	90,6	301,6	1702,1	123,0	183,7	1143,0	122,0
5	15,3	5,2	2869,1	171,5	246,5	3915,8	234,0	349,4	9528,8	631,0
6	17,5	3,0	3799,4	200,5	659,3	4689,2	266,8	402,1	36147,0	9209,0

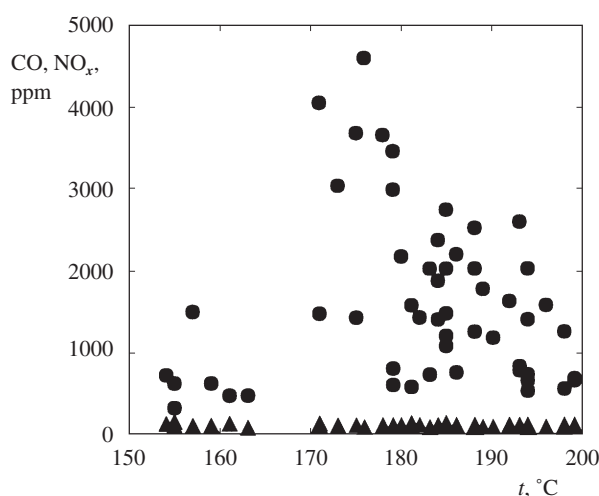
Zjištěné hodnoty uvedené v tabulce II potvrzují, že v palivu je nízký obsah síry, dusíku, vlhkosti a popela; patrný je i vysoký obsah prchavé hořlaviny (V), který je pro dřevo charakteristický. Dále jsou vidět rozdíly ve vlastnostech paliv, např. listnaté pelety mají o něco vyšší obsah popela, síry i dusíku, a tím i nižší hodnoty spalného tepla a výhřevnosti než pelety smíšené a americké. Dá se to vysvětlit přítomností kůry obsažené v těchto peletách. Americké pelety jsou svým složením velmi podobné peletám smíšeným. Pelety z černouhelných kalů vykazují nízký obsah vodíku, kyslíku a prchavé hořlaviny a vysoký obsah vody, popela, dusíku a síry oproti ostatním peletám.

Hodnoty výhřevnosti všech paliv (viz tabulka II) jsou srovnatelné s hodnotami výhřevnosti hnědého uhlí⁶.

6.3. Spaliny

Velmi důležitými údaji pro výpočet hmotnostní a entalpicke bilance jsou hodnoty z měření spalin. Všechny hodnoty naměřených koncentrací emisí pro jednotlivá paliva v tabulce III byly přepočítány a vztaheny na relativní obsah kyslíku 11%, suchý plyn a standardní podmínky (0 °C; 101,3 kPa).

Ačkoli spalování probíhalo při velkém přebytku vzduchu, objevily se vysoké koncentrace CO, které jsou projevem nedokonalosti spalování. Bylo to pravděpodobně způsobeno nízkou teplotou spalování, kdy nedošlo k úplné oxidaci uhlíku až na CO₂. Zároveň s emisemi CO se objevily i vysoké koncentrace organických látek. Po uvolnění prchavé hořlaviny z paliva nestačí organické látky ve spalovacím prostoru dohořet. Experimentální zařízení nemá šamotovou vyzdívkou, která zaručuje dostatečné vyhřátí spalovacího prostoru a udržení vysoké teploty spalování pro dohoření nespálených produktů.

Obr. 2. Závislost emisí CO a NO_x na teplotě spalin (t); ● CO, ▲ NO_x

Emise síry nebyly vůbec detegovány, i když palivo obsahovalo několik setin až desetiny procenta síry. Dá se to vysvětlit tím, že proběhla reakce s uhlíčanem draselným. Síra se tak dostala do popela, a ne do spalin.

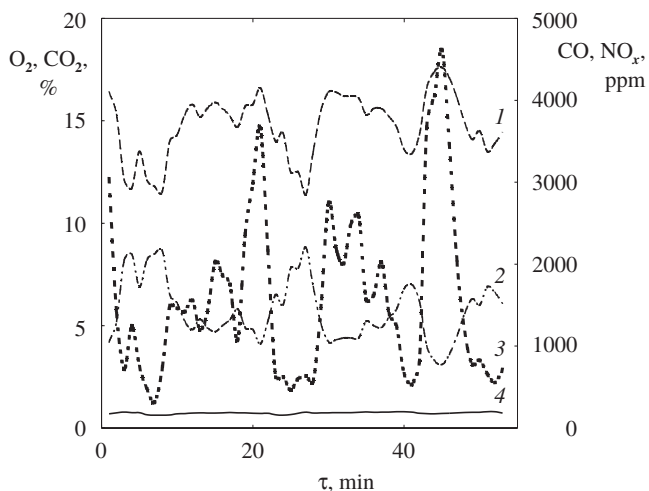
Z tabulky III vyplývá, že u černouhelných kalů byly naměřeny velmi vysoké koncentrace všech polutantů.

Některé závislosti z průběhu měření emisí pro netříděné listnaté pelety jsou zaznamenány v grafech na obrázcích 2–4.

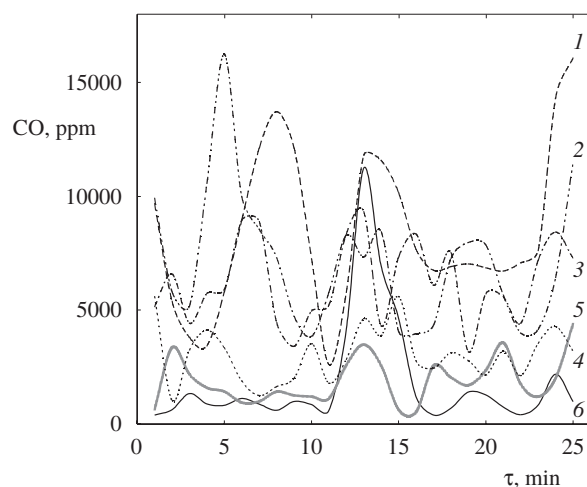
Obr. 2 představuje závislost emisí CO a NO_x na teplotě spalin. Z této závislosti je patrné, že s rostoucí teplotou spalin

klesá obsah CO a stoupá obsah NO_x . Z grafu na obr. 3 je zřejmé, že zároveň při růstu obsahu CO_2 roste také obsah NO_x a dochází k poklesu obsahu O_2 a CO a naopak. Průběžný

pokles a vzrůst všech těchto hodnot byl způsoben diskontinuálním spalováním způsobeným dávkováním paliva. Graf na obr. 4. naznačuje, proč byla pro bilancování systému zvo-



Obr. 3. Závislost emisí O_2 (1), CO_2 (2), CO (3) a NO_x (4) na čase τ



Obr. 4. Časová závislost emisí CO na změně nastavení dávkování paliva (hodnoty dávkování viz kap. 4.3.)

Tabulka IV

Hmotnostní bilance v kg (číslo paliva viz kap. 4.1.)

Palivo č.	1	2	3	4	5	6
Palivo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Vzduch suchý	19,95	21,14	34,90	18,11	18,65	30,90
Vlhkost vzduchu	0,15	0,12	0,22	0,11	0,11	0,19
<i>Vstupy celkem</i>	<i>21,10</i>	<i>22,26</i>	<i>36,12</i>	<i>19,22</i>	<i>19,76</i>	<i>32,09</i>
Spaliny suché	20,40	21,64	35,43	18,53	19,10	31,35
Vlhkost spalin	0,72	0,68	0,77	0,72	0,58	0,65
Nedopal	0,01	0,01	0,006	0,005	0,005	0,19
<i>Výstupy celkem</i>	<i>21,13</i>	<i>22,33</i>	<i>36,206</i>	<i>19,255</i>	<i>19,685</i>	<i>32,19</i>
<i>Diference, %</i>	<i>0,14</i>	<i>0,31</i>	<i>0,24</i>	<i>0,18</i>	<i>0,35</i>	<i>0,31</i>

Tabulka V

Entalpické bilance v kJ (číslo paliva viz kap. 4.1.)

Palivo č.	1	2	3	4	5	6
Palivo	18542,0	18682,0	20172,0	19100,0	19112,0	19472,0
Spalovací vzduch	463,2	403,7	680,5	345,8	337,4	698,7
Vlhkost vzduchu	382,1	303,6	557,0	278,3	278,0	483,2
<i>Vstupy celkem</i>	<i>19387,3</i>	<i>19389,3</i>	<i>21409,5</i>	<i>19724,1</i>	<i>19727,4</i>	<i>20653,9</i>
Spaliny suché	3764,0	4515,1	4981,7	4147,5	4457,6	5349,4
Spálení CO	304,0	304,0	709,3	202,6	506,6	1114,5
Vlhkost spalin	2049,8	1959,8	2188,3	2103,8	1700,6	1831,1
Nedopal	82,8	25,8	81,7	47,4	60,2	1359,8
Využití tepla vzduchu	12547,9	12047,9	13135,5	12653,8	12375,4	10036,5
Nezjištěné ztráty	638,8	536,7	313,3	569,0	627,0	962,6
<i>Výstupy celkem</i>	<i>19387,3</i>	<i>19389,3</i>	<i>21409,5</i>	<i>19724,1</i>	<i>19727,4</i>	<i>20653,9</i>
<i>Účinnost, %</i>	<i>64,7</i>	<i>62,1</i>	<i>61,4</i>	<i>64,2</i>	<i>62,7</i>	<i>48,6</i>

lena hodnota dávkování paliva 5. Emise CO jsou při tomto dávkování nižší než při ostatních a mají rovnoměrnější průběh.

Pro doplnění byly u vzorků č. 2–6 naměřeny produkty nedokonalého spalování C_xH_y , VOC, PAH. Je nutno zdůraznit, že při stanovení polycyklických aromatických uhlovdíků bylo zjištěno velké množství organických kyslíkatých sloučenin, což bylo pravděpodobně způsobeno pyrolýzou paliva.

Pro běžně dostupné palivo, kterým jsou směsné pelety, byly navíc změřeny emise PCB, PAH, PCDD/F. Koncentrace PAH byla $191,4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (objem emisí použitý při stanovení koncentrace byl přepočten na normální podmínky). Nejvíce zastoupeny byly sloučeniny: fenantren, acenaftalen, fluoranthen, fluoren a naftalen. Suma di- až oktachlorbifenylů byla $326 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$. Tyto sloučeniny jsou označovány jako prekurzory PCDD/F. Dále byly naměřeny emise ne- ortosubstituovaných polychlorovaných bifenylů $24,1 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ (tj. $0,037 \text{ ng TEQ}\cdot\text{m}^{-3}$). Obsah PCDD/F byl stanoven také v TEQ a činil $4,5 \text{ ng TEQ}\cdot\text{m}^{-3}$. Hodnoty PCB a PCDD/F byly ovlivněny obsahem chloru ($0,11 \text{ hm.}\%$), který byl stanoven elementární analýzou. Limitní hodnota pro PCDD/F při spalování komunálních odpadů činí $0,1 \text{ ng TEQ}$ (tzv. toxický ekvivalent). m^{-3} ; v tomto případě je zřejmé, že byla výrazně překročena. Emise chlorovaných sloučenin vznikají právě spalováním dřeva a dřevěných odpadů. K jejich tvorbě dochází za nepříznivých spalovacích podmínek nebo při vyšším obsahu chlorovaných sloučenin.

6.4. Nedopal

V průběhu spalování nebylo spáleno veškeré palivo. Vzniklý nedopal zůstával převážně ve vnitřním prostoru kamen. Součástí nedopalu bylo také velké množství propadu, způsobené rozmělněním pelet na menší fragmenty, které propadly roštem nespálené, nebo celé pelety vypadly mimo rošt. Pro eliminaci tohoto propadu bylo proměřeno palivo tříděné (vzorky č. 2 a 4). Jak je vidět v tabulce I u listnatých pelet, byl nedopal snížen o $\sim 30\%$ a u směsných pelet o $\sim 40\%$. U černouhelných kalů navíc, v důsledku vyšší teploty hoření, docházelo ke tvorbě škváry, která zůstávala na roštu, a tím zabraňovala propadu popela do popelníku. Rošt musel být pravidelně během měření čištěn a aby nedocházelo k velkým diferencím při analýze, bylo nutné nedopal zhomogenizovat.

6.5. Hmotnostní a entalpické bilance

Hmotnostní a entalpické bilance byly počítány standardními postupy. Hodnoty výsledků bilancí jsou zaznamenány v tabulkách IV a V.

V hmotnostní bilanci je rozdíl mezi vstupem a výstupem vyjádřen diferencí v procentech a je způsoben různou přesností vzorkování a různou přesností jednotlivých metod stanovení.

Výsledkem entalpické bilance je účinnost zařízení, která se pohybuje pro paliva z biomasy v rozmezí $61\text{--}65\%$. Pro černouhelné kaly byla vypočtena účinnost 49% . Jak bylo zjištěno, upravené černouhelné kaly, i díky vysokým koncentracím emisí, nejsou vhodné jako palivo pro spalování v tomto zařízení. K tomuto zjištění přispívá i fakt, že palivo, ačkoli má vysoký obsah vlhkosti, vyvíjí vysokou teplotu hoření, při které

dochází ke tvorbě škváry, což je velmi nežádoucí vzhledem k velikosti a tvaru roštu.

Nezjištěné ztráty při výpočtu entalpické bilance jsou pravděpodobně nespálené uhlovdíky při nedokonalém spalování a ztráty tepla sáláním, konvekcí apod.

7. Závěr

Experimenty prováděné v této práci byly zaměřeny na hodnocení biomasy jako alternativního paliva pro spalování v lokálním topeništi Peletop 5.1. Hodnocení bylo realizováno pomocí hmotnostní a entalpické bilance. Bylo potvrzeno, že pro dané spalovací zařízení je nutné speciálně upravené palivo ve formě pelet o průměru max. 1 cm z dřevěných pilin. Pelety vyrobené na bázi černouhelných kalů se při spalovacích zkouškách neosvědčily z důvodů zanášení spalovacího roštu a vzniku vysokých koncentrací produktů nedokonalého spalování.

Z hlediska emisí bylo potvrzeno, že oxidy síry při spalování zkoumané biomasy nevznikají. Naproti tomu vzniká velké množství produktů nedokonalého spalování (CO a vyšších uhlovdíků) i při velkém přebytku vzduchu. U všech druhů paliv biomasy byly emise srovnatelné, pouze černouhelné kaly produkovaly větší množství všech emisí. Emise chlorovaných sloučenin překročily stanovený limit pro spalovny komunálních odpadů $0,1 \text{ ng TEQ}\cdot\text{m}^{-3}$.

U tříděných paliv (biomasy) byla zjištěna menší množství nedopalu.

Výsledek hmotnostní bilance ukázal, že spalování dřevěných pelet je z hlediska vzniku odpadu minimální. Diference při výpočtu hmotnostní bilance byla zanedbatelná. Její hodnota byla ovlivněna různými metodami stanovení.

Entalpická bilance stanovila účinnost křbových kamen na $61\text{--}65\%$ v případě použití biomasy. Účinnost při použití pelet z černouhelných kalů byla 49% .

Autoři děkují panu Ing. J. Jiránkovi z Ministerstva životního prostředí ČR za jeho aktivitu při vedení tohoto projektu.

LITERATURA

- Petříková V.: *Biomasa pro energii*. www.vurv.cz/czbioml, 1999.
- Jech L.: *Sborník Biomasa – zdroj obnovitelné energie v krajině, Průhonice, 5.–6. října 2000*.
- Noskivič P.: *Biomasa a její energetické využití*. PHARE, Praha 1995.
- Forsberg G.: *Biomass Bioenergy* 19, 17 (2000).
- Mukadi L., Guy C., Legros R.: *Fuel* 79, 1125 (2000).
- Šešulka V.: *Analýza paliv*. SNTL/ALFA, Praha 1970.
- Splithoff H., Hien K. R. G.: *Fuel Process. Technol.* 54, 189 (1998).
- Rédr M., Příhoda M.: *Základy tepelné techniky*. SNTL, Praha 1991.
- Kára J.: *Pracovní seminář Využití biomasy jako obnovitelného zdroje energie, Praha, 10. května 1995*.
- van der Lans R.P., Pedersen L.T., Jensen A., Glarborg P., Dam-Johansen K.: *Biomass Bioenergy* 19, 199 (2000).
- Ndiema C. K. W., Mpendayoe F. M., Williams A.: *Energ. Conv. Manage.* 39, 1357 (1998).

12. Šimíčková G.: *Diplomová práce*. VŠCHT, Praha 1998.
13. Schmidt H.: *Diplomová práce*. VŠCHT, Praha 1997.
14. Chagger H. K., Kendall A., McDonald A., Pourkashanian M., Williams A.: *Appl. Energy* 60, 101 (1998).
15. Mascolo G., Lotito V., Spinosa L., Mininni G., Bagnuolo G.: *Environ. Eng. Sci.* 16, 287 (1999).
16. Rausa R., Mascolo G., Bassetti A.: *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 52, 115 (1999).
17. Jenkins B. M., Jones A. D., Thurn S. Q., Williams R. B.: *Atmos. Environ.* 30, 3825 (1996).
18. Koziński A., Saade R.: *Fuel* 77, 225 (1998).
19. Jenkins B. M., Baxter L. L., Miles T. R. Jr., Miles T. R.: *Fuel Process. Technol.* 54, 17 (1998).
20. Kazmarová H.: *Sborník konference Měření a hodnocení znečištění ovzduší E'97, Praha, 13. března 1997.*

E. Machníková^a, M. Koutský^a, F. Hrdlička^b, and J. Vošta^a (^a*Department of Power Engineering, Faculty of Environmental Technology, Institute of Chemical Technology,*

Prague ^b*Department of Fluid Dynamics and Power Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Czech Technical University, Prague*): **Combustion Efficiency and Emissions in the Combustion of Biomass in Stoves**

The paper presents mass and enthalpy balances in the combustion of biomass in stoves. The first part of the paper concerns the biomass as an alternative source of energy, the combustion processes, formation of emissions and the method of calculation of mass and enthalpy balances. In the second part, experimental data are presented involving four types of fuels: foliate pellets, mixed pellets, "American" pellets and sludge pellets of the bituminous coal type. The efficiency of the stove was calculated for all the fuels using mass and enthalpy balances. In addition, analysis of products of imperfect combustion, such as C_xH_y , volatile organic compounds, persistent organic pollutants (polycyclic aromatic hydrocarbons, polychlorinated biphenyls, polychlorinated dibenzodioxines and dibenzofurans) was performed.



Univerzita Pardubice Fakulta chemicko-technologická

pořádá veletrh pracovních příležitostí

ChemKontakt 2003

dne 16.4.2003 v Aule Univerzity Pardubice

Program:

8:00–10:00 registrace firem
10:00–15:00 ústní prezentace v aule
firemní prezentace u stánků

ChemKontakt 2003 je prezentací chemických firem působících v ČR s cílem informovat studenty o profilech firem a možnostech uplatnění absolventů. K dispozici bude katalog s informacemi o zúčastněných firmách.

Registrační poplatek ve výši 4.270,00 Kč (3.500,00 Kč + 22% DPH), prosíme uhradit nejpozději do 14.3.2003 na účet č. 37030-561/0100, variabilní symbol 3900 330001

Bližší informace o veletrhu, přihlášky k účasti a podmínky účasti je možné získat na děkanátu Fakulty chemicko-technologické, www.upce.cz, kontaktní osoby: doc. Ing. Ladislav Svoboda, CSc. a Ing. Iva Ulbrichová, CSc., nám. Čs. legií 565, 532 10 Pardubice, dekanat@upce.cz, tel 466 037 514, -507.

Podklady pro prezentaci v katalogu lze zaslat na uvedenou adresu i elektronickou poštou nejpozději do 14.3.2003.