

Zdeněk Lyčka

DŘEVNÍ PELETA II

spalování v malých zdrojích tepla



Krnov 2011

Publikace byla zpracována za finanční podpory Státního programu na podporu úspor energie a využití obnovitelných zdrojů energie pro rok 2011 – Program EFEKT

Vydalo: **LING Vydavatelství s.r.o.**
nám. Osvobození 2057/8
794 01 Krnov
www.lingvydavatelstvi.cz

Odborná korektura: Prof. Ing. Pavel Noskiewič, CSc.
Jazyková korektura: PhDr. Lenka Kopencová
Sazba a grafická úprava: STAPS, Kosmická 741, 149 00 Praha
Tisk: GRAFOTECHNA PRINT, s.r.o.,
Lýskova 1594, Praha 5 - Stodůlky

© LING Vydavatelství s.r.o.
Veškerá práva vyhrazena
1. vydání

ISBN 978-80-904914-1-0

OBSAH

PŘEDMLUVA.....	6
ÚVOD.....	8
SPALOVÁNÍ TUHÝCH PALIV.....	9
Spalování tuhých paliv a jeho produkty.....	9
Nedokonalé spalování.....	10
Hořlavina.....	11
Spalování biomasy.....	11
Zplyňování dřevní hmoty.....	12
SPALOVÁNÍ DŘEVNÍCH PELET	17
Palivo – dřevní peleta	18
Požadované množství paliva.....	19
Spalovací vzduch.....	21
Potřebné množství spalovacího vzduchu.....	21
Zápalná teplota.....	23
Spaliny	25
Stanovení objemu vzniklých spalin.....	25
Složení spalin – emise škodlivin.....	28
Tuhé zbytky spalování.....	32
Teplo.....	34
Příklad z praxe.....	35
ÚČINNOST SPALOVÁNÍ A SPALOVACÍHO ZAŘÍZENÍ.....	37
Obecná definice účinnosti.....	37
Účinnost spalování	37
Účinnost spalovacího zařízení	38
Příkon – souhrn energií vstupujících do soustavy.....	39
Výkon – energie předaná soustavě.....	40
Ztráty.....	41
ÚČINNOST MALÝCH PELETOVÝCH KOTLŮ.....	43
Přímá metoda.....	43
Nepřímá metoda.....	45

Ztráta citelným teplem spalin.....	45
Ztráta plynným nedopalem.....	47
Ztráta mechanickým nedopalem.....	48
Ztráta sdílením tepla do okolí.....	50
Reálná provozní účinnost peletového kotle.....	51
Vliv spotřeby elektrické energie.....	52
Příklad z praxe.....	54
KONSTRUKCE PELETOVÝCH HOŘÁKŮ	56
Základní vrstva paliva.....	57
Provozní stavy peletových hořáků, způsoby zapalování.....	58
Dělení hořáků podle tvaru spalovací komory.....	59
DEFINICE VYBRANÝCH POJMŮ	68
LITERATURA	71

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu Prof. Ing. Pavlu Noskievičovi, CSc, za velice cenné rady, které mi poskytl při odborné recenzi této knihy.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Josefu Hodboďovi, bez jehož morální a technické podpory by tato kniha i její první díl pravděpodobně nikdy nevznikly.

PŘEDMLUVA

Efektivní využívání všech dostupných zdrojů energie je vedle racionálního hospodaření s energií základním kamenem energetické budoucnosti. A je přitom jedno, zda se jedná o zdroje fosilní, či obnovitelné. Význam obnovitelných zdrojů energie posiluje zejména skutečnost, že se většinou jedná o zdroje domácí, jejichž využívání snižuje energetickou dovozovou závislost. Environmentální efekt je přitom méně výrazný a často diskutabilní. V podmínkách České republiky je nejvýznamnějším mezi nově rozvíjenými obnovitelnými zdroji biomasa a požadavek efektivity a vysoké účinnosti transformace energie zcela jednoznačně ukazuje na její využívání pro produkci tepla, vytápění. Hlavními argumenty jsou využívání lokálních zdrojů a vysoká účinnost.

Individuální vytápění dřevem, tedy biomasou, má zejména na venkově dlouhou tradici a moderní krbová a kachlová kamna nabízejí slušný uživatelský komfort a vysoký stupeň využití energie paliva. Rostoucí zájem o vytápění biomasou vyvolal zájem o její další a dosud málo využívané druhy a současně také o systémy s vysokým uživatelským komfortem, běžným při vytápění plynem. Protože je při spalování tuhých paliv největším problémem příprava paliva pro spalování a manipulace s ním, bylo zapotřebí nalézt způsob úpravy biomasy pro spalování do formy, umožňující použití v moderních a technicky náročných zařízeních s automatickou dopravou paliva do ohniště. Řešením se ukázala být peletizace. Je to cesta technicky, energeticky i ekonomicky náročnější, než spalování kusového dřeva, či balíků slámy, je však univerzálnější a jak se brzy ukázalo životaschopná. Vedla k vývoji a komerční nabídce zařízení pro spalování pelet a současné peletové kotle nabízejí uživatelům komfort téměř srovnatelný s vytápěním plynem. Protože se jedná o kotle nové a veřejnosti nepřiliš známé koncepce, rozhodl se Ing. Zdeněk Lyčka, člověk s bohatými zkušenostmi z konstrukce, zkoušení a provozu peletových kotlů, zpracovat své poznatky do populárně-naučné publikace, určené současným i potenciálním uživatelům této nové technologie. Téma je to obsažné a dosud již vydalo na dvě knihy. V první z nich, nedávno vydané, se autor věnoval samotným peletám, ve druhé se zaměřil na technologii jejich spalování.

Není vůbec snadné vysvětlit populární formou zákonitosti procesu spalování a tvorby škodlivin, principy stanovení účinnosti kotlů, či konstrukční parametry a provozní vlastnosti peletových kotlů a jejích podstatných částí. Autor se o to pokusil a podle mého soudu docela úspěšně. Definitivní hodnocení vysloví samozřejmě čtenáři.

Prof. Ing. Pavel Noskivič, CSc

V Ostravě 12. listopadu 2011

ÚVOD

Vážený čtenáři. Právě se Ti dostává do rukou druhý díl knihy o dřevní peletě. Ten první byl věnován peletě samotné. Její historii, technologii výroby, základním vlastnostem. Nyní přichází řada na její spalování. Tedy to, kvůli čemu vlastně peleta vznikla.

Ze strany obchodníků a výrobců spalovacích zařízení je zákazník zahlcován stále větším množstvím informací o technické úrovni jejich výrobků. Ale jak dalece reálné jsou tyto informace a co většina z nich vlastně znamená, to se zpravidla nedozví. A proto také vznikla tato kniha. Jejím cílem není provést detailní rozbor mechanismů a technologií spalování, nemá ambice být učebnicí. Měla by být spíše praktickou pomůckou pro ty, kteří se spalováním dřevních pelet přicházejí každodenně do styku ve svých domovních kotelnách a mají zájem se s touto problematikou seznámit poněkud podrobněji.



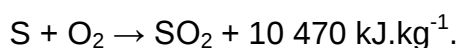
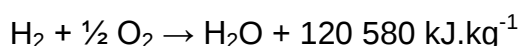
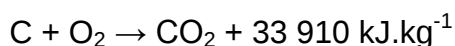
SPALOVÁNÍ TUHÝCH PALIV

Dřevní peleta se řadí mezi tzv. tuhá paliva. Před tím, než se dostanu k popisu principu a technologií jejího spalování, je důležité se nejprve seznámit obecnými pojmy z teorie spalování tuhých paliv. Rozhodně se nechci pouštět do detailního rozboru spalovacího procesu, tedy podrobně popisovat statiku a kinetiku spalování, ale zaměřím se především na základní výstupy s ním spojené. Vznik tepla a produkci škodlivin a jejich emisí do ovzduší.

Spalování tuhých paliv a jeho produkty

Hned na úvod je nutné udělat si inventuru v pojmech spalování a hoření. Obecná definice **spalování hovoří o oxidačním procesu, při kterém se uvolňuje energie chemicky vázaná v palivu. Hoření je proces oxidace paliva, při kterém je uvolňování chemicky vázaného tepla doprovázeno navíc světelným efektem**, což tedy znamená, že teplota produktů hoření dosáhla oblasti viditelného spektra. Takže ne vždy, pokud hovoříme o spalování, musí zákonitě docházet k hoření (v současnosti frekventovaný pojem spalování tuků a cukrů při hubnutí), ale pokaždé, když hovoříme o hoření, jedná se o proces spalování.

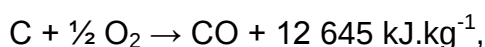
Hoření je souhrnem exotermických reakcí hořlavých složek paliva a okysličovadla. Hořlavými složkami jsou u tuhých paliv **uhlík (C), vodík (H₂) a síra (S)**, a souhrnně je označujeme jako **hořlavina**. Okysličovadlem je **kyslík (O₂)**, který je přiváděn do ohniště spalovacím vzduchem. Protože se jedná o exotermické reakce, jejich výsledkem je dle [1] uvolnění velkého množství energie dle vztahů



Na konci spalovacího procesu se objeví řada více či méně žádoucích produktů. Tím základním a nejdůležitějším je získané **teplo**, těmi méně vítanými (či spíše nežádoucími) jsou **reakční zplodiny (spaliny) a tuhé zbytky spalování**. Jak je z výše uvedených rovnic patrné, plynnými produkty dokonalého spálení hořlaviny jsou **oxid uhelnatý (CO₂) a oxid siřičitý (SO₂)** a dále pak **voda (H₂O)**, ta zpravidla ve formě vodní páry. Palivo ovšem vedle spalitelných složek obsahuje také složky nespalitelné, kterými jsou chemicky vázané minerály, souhrnně nazývané **popeloviny**. V průběhu spalování dochází k chemické přeměně popelovin a tuhý minerální zbytek vzniklý ideálním spálením paliva se pak nazývá **popel** [2]. Spalovacím vzduchem a částečně i palivem je do procesu hoření „přimíchán“ také **dusík (N)**, který rovněž, byť nepatrně oxiduje. Ovšem oxidace dusíku je nežádoucí endotermickou reakcí (tato reakce na rozdíl od exotermické teplo spotřebovává), při které navíc vznikají jedovaté plyny NO a NO₂, které jsou obecně označovány jako **oxidy dusíku (NO_x)**.

Nedokonalé spalování

Spalování tuhých paliv v malých ohništích však nikdy neprobíhá za ideálních podmínek. Především nedochází k ideálnímu vyhoření uhlíku na oxid uhličitý. Část jej reaguje pouze na **oxid uhelnatý (CO)**, což je spojeno se ziskem menšího množství energie. Není zde prostor na detailní popis poměrně složitého reálného mechanismu oxidace uhlíku, proto popíšeme tento proces nedokonalého spalování dle [1] rovnicí



ze které je patrné, že pouze částečnou oxidací uhlíku na CO se uvolní jen třetina možné energie, což je spojeno se značným snížením účinnosti spalování. Část uhlíku se při nedokonalém spalování také váže ve spalinách ve formě různých organických látek (uhlovodíkových sloučenin), obecně nazývaných **organický plynný uhlík (OGC)**. Část se „vysráží“ ve formě sazí, a pokud tyto nezanesou stěny kotlového tělesa a komínu, pak navýší podíl popela emitovaného horkými spalinami do ovzduší ve formě **tuhých znečišťujících látek (TZL)**.

Hořlavina

V tuhých palivech nacházíme hořlavinu ve dvou formách. Tzv. **prchavá hořlavina** se dá zjednodušeně definovat jako plyn, který se z paliva uvolňuje při jeho zahřátí na určitou teplotu a vnějším projevem jejího spalování je plamen. **Neprchavý zbytek (pevný podíl hořlaviny)** je hořlavina, která v palivu zůstane po uvolnění prchavé hořlaviny. Je tedy vázán v **pevném zbytku paliva**, což je již „odplyněné“ palivo obsahující vedle pevného podílu hořlaviny také popeloviny (koks, dřevěné uhlí). Vnější projevem hoření neprchavého zbytků je žhnutí (tolik známe ze spalování dřevěného uhlí při grilování). Čím starší je palivo, tím nižší má podíl prchavé hořlaviny, jak je patrné z přiložené tabulky. Proto například několik měsíců „stará“ sláma má větší podíl prchavé hořlaviny, než několik let rostoucí dřevo.

<i>palivo</i>	koks	černé uhlí	hnědé uhlí	dřevo	sláma
<i>prchavá hořlavina [%]</i>	2	20	55	75	80

Koks je prakticky bez prchavé hořlaviny, protože jeho výroba spočívá právě v odplynění černého uhlí. Proto koks nehoří plamenem, ale pouze žhne za vysokých teplot. Černé uhlí je díky malému podílu prchavé hořlaviny někdy označováno také jako nízkoplamenné palivo. Hnědé uhlí s větším podílem prchavé hořlaviny je naopak mezi fosilními palivy bráno jako palivo dlouhoplamenné. A u biomasy, která má největší podíl prchavé hořlaviny, se proto běžně, ale bohužel nepřesně, zaměňují pojmy spalování a zplyňování. Tato nepřesnost je vyvolána skutečností, že proces hoření tuhého paliva vždy prochází zplyňovací fází, která poté přechází do fáze spalování. Velký obsah prchavé hořlaviny v biomase tyto fáze zvyrazňuje.

Spalování dřevní biomasy

Zaměřme se ale na to hlavní, co nás v této knize zajímá, a tím je spalování dřevní biomasy. Jak bylo již výše uvedeno, více jak 75 % její hořlaviny tvoří prchavý podíl. Při spalování dochází v počáteční fázi k zahřívání paliva z biomasy od okolního prostředí (žhavé tzv. základní vrstvy). Při teplotách nad 100 °C dochází k vypaření vody

obsažené v palivu. Při zvýšení teploty paliva nad hranici 150 °C se začíná nejprve mírně uvolňovat prchavá hořlavina. Po překročení 200 °C se proces „odplyňování“ začíná značně zrychlovat a okolo hranice 250 °C dochází ke vzplanutí prvních spalitelných složek obsažených v uvolněné prchavé hořlavině, které se při spalování dřeva často trochu nepřesně říká „**dřevoplyn**“. Při překročení hranice 450 °C se zapalují vodík a uhlovodíky [3] a teplota plamene prudce narůstá na hodnotu 900 – 1400 °C (podle vlhkosti paliva a přebytku spalovacího vzduchu). Při teplotách okolo 600 °C dochází k zapálení pevného podílu hořlaviny v dřevěném uhlí. Aby došlo k dokonalému vyhoření prchavé hořlaviny, je nutné udržet plamen v teplotách nad 900 °C a přivést do něj dostatečné množství kyslíku. Tedy dokonale jej promísit se spalovacím (sekundárním) vzduchem. Velké množství, popřípadě nepředeřátý spalovací vzduch, však mohou ochladit plamen pod kritickou hranici a spalovací proces přerušit. Toho samého efektu (tedy ochlazení) se „docílí“ v okamžiku kontaktu plamene s vodou chlazenými stěnami kotlového tělesa. Výsledkem je snížení účinnosti spalování v důsledku nedokonalého vyhoření uhlíku. Vnější projevem tohoto stavu je tmavý kouř z komína a sazemi zanesené kotlové těleso a komínový průduch. Proto nejmodernější kotle na spalování biomasy mají velké spalovací komory a dlouhé dohořivací cesty s velkým množstvím žáruvzdorné vyzdívky.

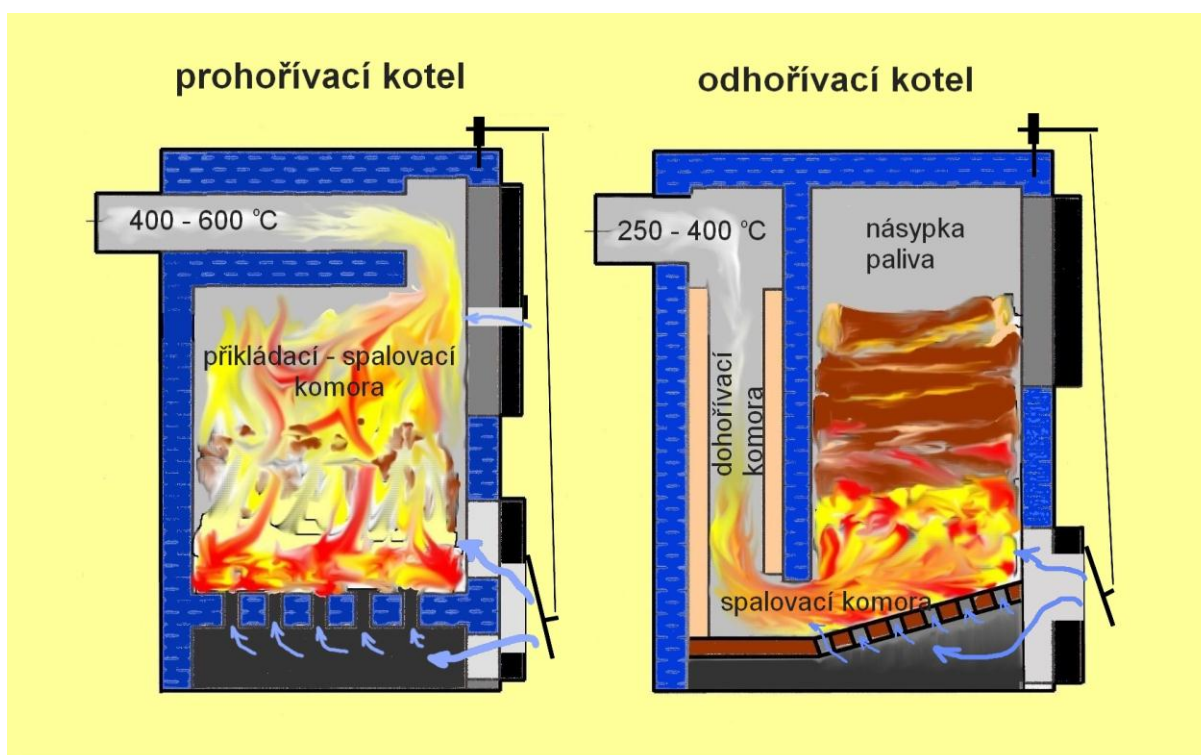
Zplyňování dřeva

Často slyším od různých odborníků a obchodníků komentáře o tom, jak v tomto kotli dochází ke zplyňování dřeva, v onom nikoliv a v tamtom dokonce k dvojímu zplyňování. Z toho, co jsem uvedl již výše, lze dojít k jedinému závěru. Pokud v daném kotli dochází k takovému hoření dřevní hmoty, že je evidentně vidět plamen, musí v něm zákonitě také docházet ke zplyňování, tedy uvolňování prchavé hořlaviny. Jak si uvedeme dále na příkladu prohořivacího kotle, někdy nemusí dokonce ani být viděn plamen. Problém není v tom, zda v konkrétním kotli dochází ke zplyňování, ale jak rychle je prchavá hořlavina uvolňována a především jak efektivně je následně využita pro produkci tepla. Dokonce i komerčně prodávané dřevěné uhlí obsahuje až 20 % prchavé hořlaviny, která i na otevřeném roštu při grilování zplyňuje. Popišme si tedy zkráceně, jak probíhá spalování a zplyňování v základních technologiích, které

využívají malé teplovodní kotle. Obecný popis technologií spalování kusového dřeva zdánlivě nemá moc společného s tématem této knihy, tedy spalováním dřevních pelet. Ale jak uvidíte dále, porozumění je velice důležité pro celkové pochopení technologií peletových kotlů.

- Začneme tedy již zmíněným **prohořivacím kotlem**. Pokud na žhavou vrstvu dřevěného uhlí přiložíme čerstvá polena dřeva, okamžitě dojde k jeho nahřívání a ve velice krátké době začne dřevo zplyňovat – uvolňovat se prchavá hořlavina. Rychlost zplyňování a samotný průběh hoření jsou pak závislé na několika faktorech. Popišme si alespoň některé z možných scénářů. Příliš vlhké dřevo „spotřebuje“ ze základní vrstvy nahořelého paliva velké množství tepla na vysušení a prohořívá se pomaleji. Někdy dojde dokonce k takovému ochlazení spalovací komory, že sice začne proces uvolňování prchavky, ale nedocílí se „zážehové“ teploty (která jak již víme je cca 250°C). Výsledkem je zima v domě a valící se tmavošedý dým z komína (směs sazí z nedokonalého dohořívání základní vrstvy a páry z vlhkého dřeva). Pokud je dřevo drobně našťipané a ve velké vrstvě se dołoży do rozpáleného kotle (nebo po přiložení vrstvy pilin či drobného odpadu) může naopak dojít k velice rychlému „odplynění“. Spalovací komora se zahltí hořlavinou, zápalná teplota by také byla, ale chybí dostatek kyslíku k iniciaci prvního zážehu. Než se k hořlavině dostane dostatek kyslíku z pod roštu, velká její část je vytažena komínem a dochází k velkým ztrátám tepla plynným nedopalem. Zde nastává ono zplyňování bez plamene. Velkým problémem zde však může být netrpělivý kotelník. Pokud otevře horní příkládací dvířka v okamžiku, kdy k zapálení hořlaviny chybí již jen dostatečné množství kyslíku, oním otevřením dvířek kyslík dodá. Výsledkem je pak výbuch, který u tohoto typu kotlů bývá poměrně častým jevem. Zvláště pokud se spalují piliny či drobný dřevní odpad, který velice rychle zplyňuje. Ano slyšíte dobře – zplyňuje. Prohořivací kotle byly původně konstruovány pro spalování koksu, tedy paliva bez prchavky. Příkládací komora je současně komorou spalovací a nad ní je umístěn jen malý výměník tepla pro odnávání tepla ze spalin, které prakticky neobsahují žádný spalitelný podíl prchavé hořlaviny, protože koks nehoří plamenem. Vše bez jakékoliv vyzdívky, jejímž účelem je tepelně izolovat plamen od chladných stěn. Spalovací vzduch je přisáván především z pod roštu a těsně nad rošt, aby byl dostatek kyslíku pro vyhoření „tuhého“ uhlíku vázaného v pevném podílu paliva na roštu. Množství vzduchu je dá-

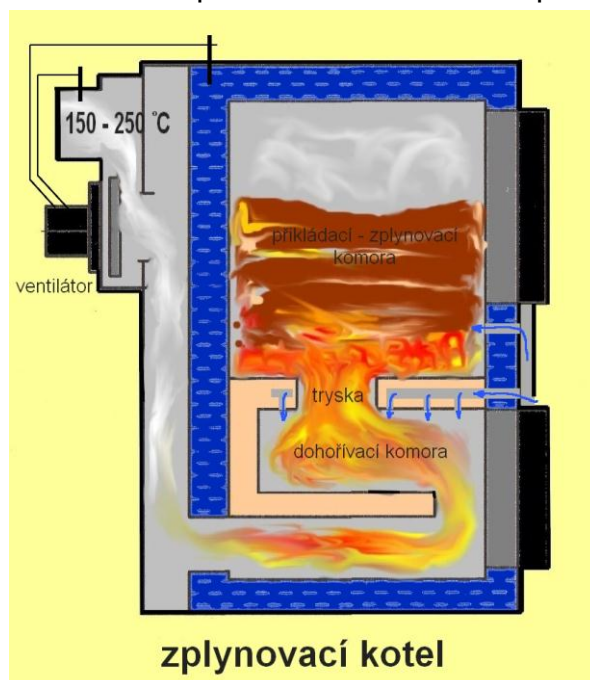
no tahem komína a velice nepřesně regulováno pouze na základě teploty topné vody. Pokud tedy v tomto typu kotlů budeme spalovat kusové dřevo, i v ideálním případě (bez výbuchů) se bude plamen velice rychle ochlazovat o vodou chlazené stěny kotle a bude docházet k velkým ztrátám, protože se zastaví proces vyhořívání „prchavky“. Tmavý kouř valící se z komína bývá velice často důsledkem spalování vlhkého dřeva v litinových prohořivacích kotlích, i když je to spíše přisuzováno na vrub uhlí či pneumatikám.



- U **odhořivacího kotle** již většinou bývá použita částečná vyzdívka a i dohořivací cesty bývají většinou dostatečně dlouhé pro spalování „dlouhoplamenných“ paliv. Zásadní problém však je v přívodu spalovacího vzduchu, jehož přísávaní množství je stejně jako u prohořivacího kotle regulováno pouze velikostí komínového tahu. Za optimálních podmínek v počáteční fázi hoření dochází k postupnému uvolňování prchavé hořlaviny a k jejímu relativně kvalitnímu vyhořívání. Kotel se dobře rozhoří a prohřátý komín začne „táhnout“. Velký tah ovšem ještě trvá i nějakou dobu ve fázi, kdy již rychlost zplyňování zpomaluje a je tedy potřebí menšího množství vzduchu. Nedostatečná regulace nemůže zabránit ochlazení plamene velkým nadbytkem nasávaného spalovacího vzduchu a opět dochází k velkému plynnému nedopalu. Stejně špatnou variantou je ovšem uzavření otvorů pro při-

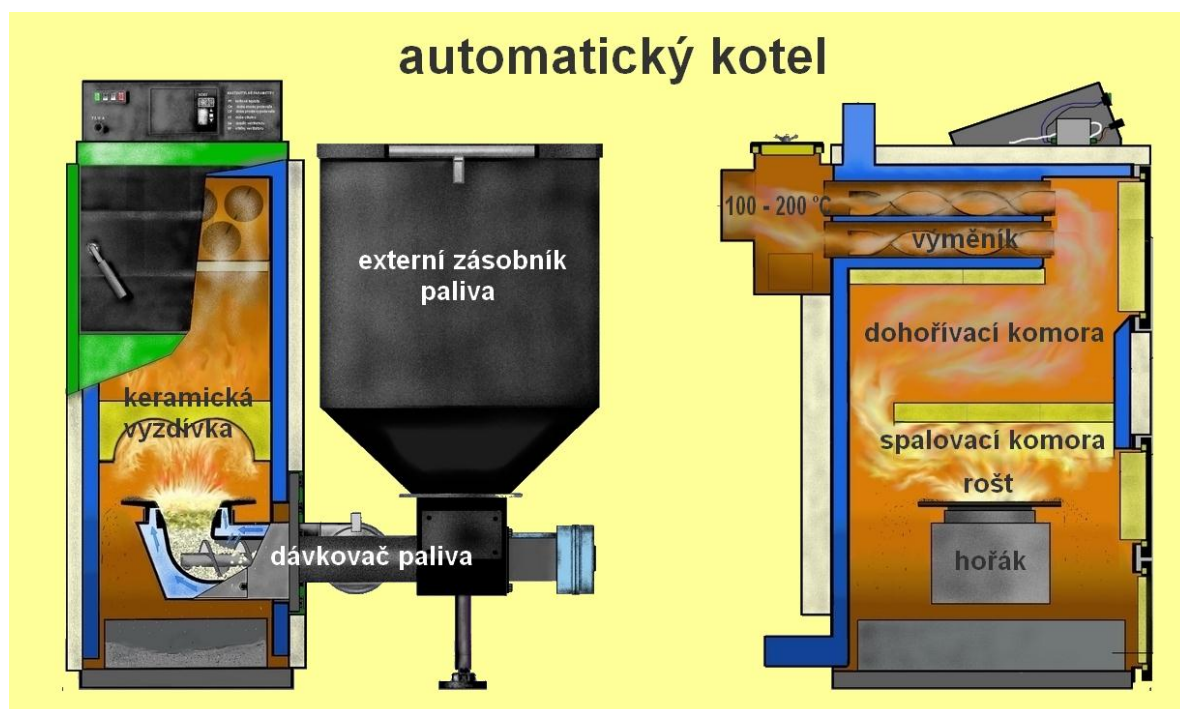
sávání spalovacího vzduchu obsluhou, které má zabránit přetopení systému. Tím ovšem obsluha způsobí „odsátí“ velkého množství prchavé hořlaviny do komína, neboť ta se i po „odstavení“ kotle v rozžhavené příkladací komoře uvolňuje z paliva a prostě nestačí vyhořet.

- **Zplyňovací kotle** mají ventilátorem řízený přívod spalovacího vzduchu. Vhodnou konstrukcí násypné (příkladací) komory lze docílit toho, že dřevo se nahřívá postupně a i prchavá hořlavina je uvolňována postupně. Navíc mají velkou dohořivací komoru vytvořenou ze žárobetonových tvarovek, ve které je udržována dostatečná teplota pro vyhoření hořlaviny a do které je přiváděn v optimálních místech sekundární spalovací vzduch. Veškerá uvolněná prchavá hořlavina musí projít rozžhavenou vrstvou paliva a tryskou ve spodní části příkladací komory do spodní spalovací komory. Velikost trysky je dimenzována tak, že dovolí průchod jen takovému množství hořlaviny, která je schopna dohořet v dohořivací komoře. „Nadbytečná“ rychle uvolněná hořlavina se hromadí nad palivem v příkladací komoře a postupně je odtahovým ventilátorem dávkována do spalovacího procesu. Množství ventilátorem přisávaného spalovacího vzduchu je často řízeno



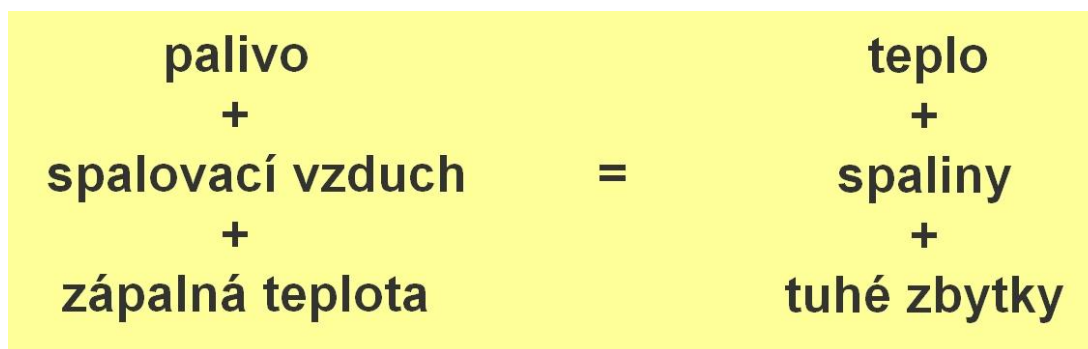
na základě údajů z čidla, které ve spalinách vyhodnocuje přebytek kyslíku (přebytek se obecně nazývá α , proto se čidlo nazývá α -sonda). Jen část vzduchu je přiváděna k roštu pro spalování tuhého podílu, větší část je míchána s plamenem v trysce či přiváděna do dohořivací komory. Vytvořený dřevoplyn je tak zužitkován s poměrně velkou efektivitou. Proto se tyto kotle se v obchodní praxi z hlediska teorie spalování nepřesně označují titulem zplyňovací. Problém zde však nastává při spalování dřeva s vlhkostí nad 20 %. Pokud je příkladací komora dosti studená, může se v horní části příkladací komory tvořit agresivní kondenzát, který během několika let kotlové těleso zejména v její horní části dokonale „rozloží“.

- Nejmodernější technologií spalování biomasy jsou tzv. **automatické kotle**. Podle platné legislativy jsou označovány jako kotle se samočinnou dodávkou paliva. Z toho vyplývá i zásadní rozdíl oproti předešlým technologiím. Zatímco u kotlů s ruční dodávkou paliva je dřevo přiloženo do násypné (příkládací) komory v množství pro několikahodinové spalování, u automatických kotlů je palivo do spalovací komory průběžně dávkováno dle potřeby v malém množství z externího zásobníku. U „obyčejných“ kotlů se přiložené palivo s různou mírou kontroly odplyní a dřevoplyn dle konkrétní technologie s různou účinností zužitkuje, je zapotřebí však mít velkou roštovou část pro dohořívání vzniklého dřevěného uhlí. Výkon kotle se reguluje množstvím přiváděného spalovacího vzduchu. Naopak při samočinné dodávce paliva je výkon regulován množstvím přiváděného paliva. Spalováno je vždy jen minimální množství potřebné pro požadovaný okamžitý výkon kotle. Je zapotřebí relativně malé roštové části, na které dochází k rychlému zplyňování i vyhoření tuhých zbytků – to vše s vysokým stupněm řízení celého spalovacího procesu. Naopak nepoměrně větší je dohořívací prostor s velkým množstvím žárobetonové vyzdívky, která umožní dokonalé vyhoření prchavé hořlaviny. Tato technologie ovšem neumožňuje spalovat dřevní hmotu ve formě kusového dříví, ale ve velikosti jednotlivých frakcí paliva v řádech centimetrů, tedy pilin, štěpky a v malých kotlích především dřevních pelet. A tím se již dostáváme k tématu této knihy.



SPALOVÁNÍ DŘEVNÍCH PELET

Shrňme si základní informace o spalování tuhých paliv, které jsme se dozvěděli v předešlé kapitole, do jednoduché rovnice



Pro dosažení optimálního průběhu celého procesu hoření je nutné zajistit, aby se reagenty z levé strany rovnice dostaly ve správný okamžik a ve správném množství na požadované místo, tedy do ohniště. Naopak produkty spalování musí být z tohoto místa v dostatečné míře odvedeny.

Převedme si to na peletový kotel. Na rošt hořáku je nutné průběžně dávkovat dostatečné množství paliva. To se zde nahřívá od již hořících pevných zbytků paliva, tzv. **základní vrstvy paliva**, a uvolňuje prchavou hořlavinu, která nad roštem v zóně vysokých teplot vyhořívá. K tomu je ale nutné přivádět dostatečné množství kyslíku, tedy přiměřené množství spalovacího vzduchu a souběžně musejí být bezpečně odváděny spaliny ze spalovací komory a popel z roštu hořáku. Pro dokonalé spálení hořlaviny musí být samozřejmě přiměřený také odvod tepla, protože přílišné ochlazení spalovací komory může ovlivnit reakční rychlost a dokonalost spalování. Jakékoliv narušení plynulého toku „reagentů“ a produktů spalování naruší také jeho plynulý a optimální průběh.

V praxi to má zajistit vhodná konstrukce spalovacího zařízení, volba vhodného paliva pro danou konstrukci a v neposlední řadě správná instalace zařízení, především napojení na topnou soustavu a komín. V této kapitole se zaměříme na základní popis jednotlivých „vstupů a výstupů“ definovaných v uvedené rovnici. Protože kniha nemá

ambice být učebnicí, ale snaží se obecně seznámit s problematikou spalování pelet, budou i následující bilanční výpočty přibližné, avšak pro obecnou charakteristiku problematiky dostatečně vypovídající.

Palivo - dřevní peleta

To nejdůležitější o dřevní peletě jako palivu jsme se již dozvěděli v 1. díle této knihy [2]. Z palivářského hlediska je důležité především její prvkové složení. Z něj se stanovuje výhřevnost (množství získaného tepla), základní požadavky na množství dodávaného spalovacího vzduchu i množství vyprodukovaných emisí. Jak rozdílná může být kvalita suroviny, ze které je peleta vyrobená, tak rozdílné může být i její prvkové složení. Výhřevnost všech druhů biomasy je přibližně stejná, protože prvkové složení biomasy je přibližně stejné a závisí především na vlhkosti suroviny. Platí to také u dřevní biomasy. Všeobecně rozšířený názor, že bukové dřevo má větší výhřevnost než smrkové je dán rozdílnou hustotou obou druhů dřeva. Ve skutečnosti je díky většímu obsahu pryskyřic smrkové dřevo výhřevnější, ale vzhledem k až o 1/3 nižší hustotě, je prostorový metr bukového dřeva „výhřevnější“ než stejný objem dřeva smrkového. U pelety to ovšem neplatí, protože ta představuje vysoce komprimovanou dřevní hmotu a zde se již projevuje vyšší výhřevnost smrkového dřeva, které se i díky vyššímu obsahu ligninu lépe lisuje. V tabulce jsou pro orientaci uvedeny pouze přibližné hodnoty prvkového složení kvalitní dřevní pelety ze smrkového dřeva (vzorek paliva v původním stavu o obsahu vody 8 %)

<i>prvek</i>	vodík	uhlík	síra	kyslík	dusík
<i>[% hmotn.]</i>	6	47	0,01	38	0,2

Co se týče ostatních vlastností, ty jsou normativně stanoveny evropskou normou EN 14961-2, podle které jsou dřevní pelety určené pro maloodběratele rozděleny do tří základních skupin dle následující tabulky

průměr	[mm]	6	nebo	8	(s tolerancí 1 mm)
délka	[mm]	3,15	až	40	(1% max. do délky 45 mm)
sypná hmotnost	[kg/m³]	≥ 600			
výhřevnost	[MJ/kg]	16,5 - 19	16,3 - 19	16,0 - 19	
obsah vody	[w-%]	≤ 10			
jemné částice	[w-%]	≤ 1			
mech. odolnost	[w-%]	≤ 97,5		≤ 96,5	
příisady	[w-%] ¹⁾	≤ 2			
popel	[w-%] ¹⁾	≤ 0,7	≤ 1,5	≤ 3,0	
tepl.def.pop. DT ²⁾	[°C]	≥ 1200	≥ 1100		
chlor Cl	[w-%] ¹⁾	≤ 0,02	≤ 0,03		≤ 0,03
síra S	[w-%] ¹⁾	≤ 0,03	≤ 0,04		≤ 0,04
dusík N	[w-%] ¹⁾	≤ 0,3	≤ 0,5	≤ 1,0	
nad rámec EN 14961-1 normativně stanoveny max. limity těžkých kovů [mg/kg suš.] ¹⁾ As≤1, Cd≤0,5, Cr≤10, Cu≤10, Pb≤10, Hg≤0,1, Ni≤10, Zn≤100					
¹⁾ v bezvodém stavu ²⁾ dle certifikačního programu ENplus					

specifikace vlastností dřevních pelet pro maloodběratele dle EN 14961-2

specifikace vlastností dřevních pelet pro maloodběratele dle EN 14961-2

Rozdělení do skupin je důležité především z pohledu volby vhodné technologie spalování, jak si uvedeme v dalším textu.

Požadované množství paliva

Peletové kotle patří do kategorie kotlů se samočinnou dodávkou paliva. To znamená, že palivo je do ohniště dopravováno průběžně v minimálních dávkách tak, aby byl zajištěn dostatečný výkon zdroje a současně minimalizovány ztráty. Nižší dodané množství než požadované znamená nedostatečný příkon energie v dodaném palivu pro potřebný výkon zdroje. Naopak vyšší dodané množství většinou může znamenat málo času pro dohoření tuhých zbytků paliva a jejich vytlačení z roštu novým palivem do popelníku (mechanický nedopal) nebo příliš rychlé uvolnění velkého množství prchavé hořlaviny z paliva a tím i málo času na její dohoření ve spalovací komoře (plynný nedopal).

A jaké je tedy ono optimální množství dodaného paliva. Pro hmotnostní tok paliva platí obecný vztah

$$m_h = \frac{3,6 \cdot P_V}{Q_N \cdot \eta} \cdot 100 \quad [kg / h]$$

kde je

m_h ... hodinová spotřeba pelet v kilogramech

P_V ... požadovaný výkon zdroje v kW

Q_N ... výhřevnost použitých pelet v MJ/kg

η ... provozní účinnost zdroje v %

V prvním díle knihy jsme se dozvěděli, že kvalitní peleta má výhřevnost 17,1 MJ/kg a průměrná provozní účinnost špičkového peletového kotle je 88 %. Po dosazení těchto hodnot do rovnice pro požadovaný výkon zdroje 1 kW zjistíme, že

$$m_h = \frac{3,6 \cdot P_V}{Q_N \cdot \eta} \cdot 100 = \frac{3,6 \cdot 1}{17,1 \cdot 88} \cdot 100 = 0,239 \quad kg / h$$

Pro dosažení požadovaného výkonu 1 kW je nutné v peletovém kotli spálit s účinností 88 % za 1 hodinu přibližně 0,24 kilogramů kvalitních pelet.

Pro výkon 10 kW je nutno spálit za hodinu 2,4 kg pelet. To je hromádka a kouzlo moderních spalovacích zařízení spočívá právě v tom, jak zařídit, aby tak malé množství hořelo spolehlivě po celou hodinu a ještě k tomu nevznikalo příliš mnoho škodlivin.

Spalovací vzduch

Spalovací vzduch dodává do procesu hoření okysličovadlo, tedy kyslík. Toho je v suchém vzduchu pouze 21 % (objemových). Zbylých 79 % objemu přiváděného vzduchu se hoření neúčastní, odebírá teplo a odvádí ho spaliny do komína. Onen „pasivní“ zbytek tvoří téměř výlučně dusík (78 % objemu suchého vzduchu). V samotném ohništi se vzduch musí optimálně rozdělit tak, aby dodal dostatečné množství kyslíku jednotlivým fázím hoření. **Primární vzduch** se přivádí na rošt hořáku a je nutný především pro dohořívání tuhých zbytků a udržování základní vrstvy paliva. **Sekundární vzduch** se mísí s plamenem a je nutný pro dohoření jednotlivých složek prchavé hořlaviny. Pokud je však příliš studený, plamen ochladí a dohořívání zpomalí (zastaví), proto je nutné jej předeheat. Pokud se s plamenem dokonale nsmísí, „okysličí“ pouze jeho krajní vrstvy (proudnice), proto je nutné plamen i vzduch rozvířit a promísení. Jak vidno, optimální dávkování spalovacího vzduchu, jeho přerozdělení i přehřev mají zásadní význam pro účinnost celého procesu hoření. Proces spalování tuhých paliv lze v reálném provozu regulovat pouze dodávkou spalovacího vzduchu.

Potřebné množství spalovacího vzduchu

Správné stanovení požadovaného množství spalovacího vzduchu pro dané zařízení je důležité jak pro konstruktéra tohoto zařízení, tak pro projektanta. Ten první musí zajistit pro navrhovaný výkon kotle dostatečně nadimenzovaný zdroj vzduchu (ventilátor) a dopravní cesty do spalovací komory. Ten druhý především dostatečný přísun čerstvého vzduchu do kotelní, protože i malý peletový kotel „spotřebuje“ desítky metrů kubických vzduchu za hodinu provozu.

Z prvkového složení paliva lze vypočítat teoretické, tzv. **stechiometrické množství kyslíku** potřebného pro jeho spálení. Z předpokladu, že suchý vzduch obsahuje objemově 21 % kyslíku, lze poté stanovit množství spalovacího vzduchu, potřebného k dokonalému spálení 1 kilogramu paliva – tzv. **stechiometrický objem suchého spalovacího vzduchu**. To je ovšem teorie vycházející z dokonalého promísení hořavin a vzduchu a dostatku času na úplnou oxidaci. V běžném ohništi není technicky

možné docílit dokonalého spálení hořlaviny při stechiometrických poměrech. Musí zde být přivedeno větší množství spalovacího vzduchu a my hovoříme o spalování za tzv. **přebytku spalovacího vzduchu** n , který je dán poměrem do ohniště **skutečně přivedeného suchého vzduchu** V_{VS} k množství **stechiometrickému (minimálnímu)** $V_{VS \min}$, tedy

$$n = \frac{V_{VS}}{V_{VS \min}}$$

Za normálních podmínek je navíc do ohniště vždy přiváděn **vlhký spalovací vzduch**, jehož objem je navýšen o objem vodní páry, který je dán jeho relativní vlhkostí.

V běžných situacích není známé přesné prvkové složení paliva ani relativní vlhkost vzduchu, proto se v praxi používají přibližné, avšak dostatečně přesné výpočty. Dle [1] lze **minimální množství spalovacího vzduchu** $V_{V \min}$ vypočítat ze znalosti **výhřevnosti paliva** Q_N [MJ/kg]. Pro tuhá paliva platí pro tento výpočet vztah

$$V_{V \min} = 0,5 + 0,242 \cdot Q_N \quad [m^3 / kg]$$

a **skutečné množství spalovacího vzduchu** V_V pak získáme navýšením o přebytek spalovacího vzduchu

$$V_V = V_{V \min} \cdot n \quad [m^3 / kg] .$$

Kvalitní dřevní peleta má průměrnou výhřevnost 17,1 MJ/kg a moderní peletové kotle spalují za standardních provozních podmínek s přebytkem vzduchu $n = 1,4 - 2$, počítejme tedy průměr $n = 1,7$ a dosadíme vše do poslední rovnice

$$V_V = (0,5 + 0,242 \cdot 17,1) \cdot 1,7 = 7,88 \quad [m^3 / kg] .$$

Na spálení 1 kg kvalitních pelet je tedy zapotřebí přivést k ohništi běžného peletového kotle přibližně 7,9 m³ spalovacího vzduchu. Pro výkon kotle 10 kW a spotřebu 2,4 kg pelet to tedy znamená 19 m³.

V praxi se běžně setkávám s malými domovními kotelny, které jsou především v období velkých mrazů dokonale uzavřeny. Tedy v době, kdy se paradoxně spaluje nejvíc paliva a je tudíž zapotřebí největší množství přiváděného spalovacího vzduchu (pro vytápění malého rodinného domku to může být až 40 m³ za hodinu).

Zápalná teplota

Jak jsme se dozvěděli v kapitole o spalování biomasy, její hoření probíhá v několika fázích, my si je v této kapitole pro názornost rozdělíme na fáze „příjmovou a výdajovou“ a to z pohledu tepelné bilance.

- **Endotermická (příjmová) fáze** je nutná pro iniciaci procesu hoření. Samotná „volně ložená“ peleta má z okolního vzduchu k dispozici dostatek reakčního kyslíku. K jejímu zapálení je však zapotřebí ji zahřát. Díky vlhkosti pod 10 % je potřeba tepla na odpaření zbytků vody relativně malá. Dalším dodáním tepla a zahřátím pelety na teploty blízké 200 °C se již uvolňuje prchavá hořlavina, ale k jejímu zapálení je nutné dosáhnout teploty okolo hranice 250 °C. Této teploty ale musí být dosaženo v místech, kde se prchavá hořlavina mísí se spalovacím vzduchem, tedy v prostoru nad peletou (samotná peleta se nahřátím na 250 °C nevznítí). Potud je tedy nutné teplo dodávat.
- Od okamžiku prvotního zapálení prchavky začíná **fáze exotermická (výdajová)**. Díky již „nastartovanému“ procesu hoření se začne uvolňovat značné množství energie a nastává prudký nárůst teploty na hranici, kdy se postupně zapalují i zbylé složky prchavé hořlaviny (450 – 650 °C vodík a uhlovodíky [3]) a také pevný podíl hořlaviny (600 °C).

V praxi probíhají ve spalovacím prostoru obě fáze souběžně. Zatímco se nově dodané palivo nahřívá na roštu od nahořelých tuhých zbytků z předešlé dávky, nad roštem již vyhořívá hořlavina z této předešlé dávky paliva uvolněná a připravuje tak teplotně ideální prostředí pro hořlavinu nově uvolňovanou. Oněm nahořelým tuhým zbytkům (uhlíkům) z předešlé dávky se říká **základní vrstva paliva**. V průběhu hoření se tato vrstva nepřetržitě obnovuje. Než stačí tuhé zbytky z „odplyněných“ pelet na roštu vyhořet na jemný popel, přibývají neustále nové, které základní vrstvu udržují v takovém stavu, že je schopna dodat následně přiloženým peletám energii v jejich endotermní fázi spalování. Při prvním spouštění hořáku je však nutné prvotní energii k zapálení základní vrstvy dodat externě. Podrobněji se o problematice zapalování hořáků, a tedy dodání zápalné teploty, dozvíme v kapitole o konstrukci peletových hořáků.

Na přiloženém obrázku je zobrazena hořící peleta (chvíli před nafocením zapálená plynovým hořákem). Jsou zde krásně viditelné všechny fáze hoření – uvolňování prchavé hořlaviny, její vznícení (plamen) po reakci se vzdušným kyslíkem nad peletou i hoření pevných zbytků hořlaviny na koncích pelety, kde je již dostatek tepla i kyslíku.



Spaliny

Spaliny jsou plynným produktem spalování. Obsahují celou škálu plynných sloučenin vzniklých v průběhu spalování a také „nevyužitý“ spalovací vzduch. Spolu se spaliny se do ovzduší ze spalovacího zařízení uvolňují také jemné tuhé částice (popeloviny, saze).

Stejně jako je důležité přesné dávkování paliva a spalovacího vzduchu do hořáku a spalovací komory, tak je důležité i správně nadimenzované odvádění produktů spalovacího procesu, tedy spalin a popela. Pokud je odvod spalin nedostatečný, ty postupně zaplňují spalovací komoru a „vytěsňují“ z ní spalovací vzduch. Může tak dojít k narušení celého spalovacího procesu, v krajním případě až k nebezpečnému havarijnímu stavu. Při konstrukci spalovacího zařízení i navrhování odtahových cest je proto nutné znát objem spalin, který v daném zařízení při spalování vzniká.

Stanovení objemu vzniklých spalin

Podobně jako při výpočtu potřeby spalovacího vzduchu, také při stanovení teoretického množství vzniklých spalin se vychází z prvkového složení paliva. Pokud je nám toto složení známo, lze stanovit výpočtem tzv. **stechiometrický (minimální) objem suchých spalin**, což je objem suchých spalin vzniklý dokonalým spálením 1 kg paliva se stechiometrickým objemem suchého spalovacího vzduchu. To ovšem hovoříme o teoretickém objemu při dokonalém spalování a za tzv. **normálních podmínek** (teplotě 0 °C a tlaku 1013 mbar). Jak ale již víme, v reálných podmínkách je nutné spalovat tuhá paliva za přebytku spalovacího vzduchu. Navíc vzniklé spaliny jsou „obohaceny“ vodní parou z paliva a vzduchu a parou vzniklou spálením palivového vodíku. Objem spalin je samozřejmě také závislý na jejich teplotě. A aby toho nebylo málo, v běžných podmínkách nedochází k dokonalému spálení všech spalitelných složek, což má za důsledek další korekce oproti ideálnímu stavu (objem CO je vyšší než objem CO₂, proto je objem spalin při nedokonalém spalování o něco vyšší oproti stechiometrickým poměrům). Z toho všeho vyplývá, že přesný výpočet reálně vznik-

lých spalin je proces velice složitý. Avšak i zde nám pro obecný popis postačí přibližné výpočty.

Pro peletové kotle lze s poměrně vysokou přesností určit **objem suchých spalin skutečně vzniklých spálením 1 kg tuhého paliva za normálních podmínek**. Za předpokladu, že palivo neobsahuje významnější množství síry (dřevní biomasa), lze použít upraveného vztahu dle [6]

$$V_{ss} = \frac{1,85 \cdot C^r}{CO_2 + CO} \quad [m^3 / kg]$$

kde je

C^r ...redukovaný hmotnostní podíl uhlíku v palivu v %

CO_2 ...objemová koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách v %

CO ...objemová koncentrace oxidu uhelnatého v suchých spalinách v %

V tomto vztahu je zahrnut vliv přebytku spalovacího vzduchu i nedokonalosti spalování. Přebytek spalovacího vzduchu lze totiž vyjádřit také jako poměr **maximální možné koncentrace oxidu uhličitého ve spalinách CO_{2max}** (teoretická hodnota platná pro ideální vyhoření uhlíku, která je závislá na druhu paliva) a **koncentrace CO_2 skutečně zjištěné ve spalinách**, tedy vztahem

$$n = \frac{CO_{2max}}{CO_2}$$

Pro dřevo se průměrná hodnota CO_{2max} pohybuje okolo hranice 20 %. Pro běžný provozní přebytek vzduchu peletového kotle ($n = 1,7$) pak lze odvodit průměrnou hodnotu skutečné provozní koncentrace **$CO_2 = 11,8 \%$** .

Nedokonalost spalování prchavé hořlaviny v rovnici „zastupuje“ zjištěná koncentrace oxidu uhelnatého ve spalinách CO . Jak již víme, čím vyšší je podíl CO ve spalinách, tím vyšší jsou také ztráty plynným nedopalem. Ovšem i u průměrně „pracujícího“ pe-

letového kotle koncentrace **CO** nepřekročí hranici 500 ppm, což představuje **0,05 objemových %** vzniklých spalin.

Nedokonalost spalování pevných zbytků hořlaviny zastupuje v rovnici redukovaný podíl uhlíku v palivu. Je to hmotnostní podíl, který získáme tak, že **hmotnostní podíl uhlíku obsaženého v původním palivu** snížíme (zredukujeme) o **hmotnostní podíl uhlíku obsaženého v pevných zbytcích po spalování (popelu)**, tedy o uhlík, který nevyhořel v dřevěném uhlí. Zde můžeme s velkou přesností počítat s tím, že původní hodnota hmotnostního podílu uhlíku v běžné dřevní peletě (47 %) se sníží maximálně o 0,5 %, protože u správně seřízených peletových kotlů je tzv. mechanický nedopal minimální.

Dosaďme tedy hodnoty pro běžný peletový kotel do původní rovnice pro výpočet skutečného objemu suchých spalin

$$V_{ss} = \frac{1,85 \cdot 46,5}{11,8 + 0,05} = 7,26 \quad [m^3 / kg]$$

Spálením 1 kg kvalitních dřevních pelet v běžném peletovém kotli vzniknou suché spaliny, které při teplotě 0 °C a normálním tlaku mají objem přibližně 7,3 m³.

Pokud budeme chtít brát v úvahu i vlhkost spalin, ta je do značné míry ovlivněna relativní vlhkostí spalovacího vzduchu. Nicméně pro běžné podmínky lze s velice slušnou přesností konstatovat, že

spálením 1 kg pelet v běžném peletovém kotli vznikne za normálních podmínek ve spalinách 0,9 m³ vodní páry, a celkový objem vzniklých spalin se tak navýší na hodnotu 8,3 m³.

Složení spalín – emise škodlivin

Shrňme si, co o složení spalín, vzniklých spalováním tuhých paliv, již víme. Za ideálních podmínek by měly obsahovat pouze plynné produkty hoření (CO_2 , SO_2 , H_2O) a dusík ze spalovacího vzduchu, který se hoření neúčastní. Ovšem v běžném ohništi spalování neprobíhá za ideálních podmínek. Především je nutné přivádět větší množství vzduchu, než je stechiometrické a do spalín se tak dostává „nevyužitý“ kyslík. Uhlík nevyhoří dokonale na CO_2 , ale část jej reaguje pouze na CO . Část nevyhořelého uhlíku se dále podílí na tvorbě celé řady uhlovodíkových sloučenin. A v reálném procesu hoření tuhého paliva oxiduje také část vzdušného dusíku (i palivového). Vedle plynných složek se ve spalínách nacházejí také tuhé částice.

Pokud bychom si chtěli udělat představu o podílu jednotlivých složek v suchých spalínách, pak téměř 79 % jejich objemu tvoří N_2 , u „bezsíratých“ dřevních pelet pak přibližně 20 % tvoří $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ a zbylé necelé jedno procento tvoří ostatní složky. Jsou to ovšem složky veskrze jedovaté a přísně kontrolované, legislativou jsou označovány jako **znečišťující látky**. Absolutní koncentrace těchto látek je tak malá, že je praktické uvádět ji v **ppm**, což je jedna miliontina celkového objemu spalín (parts per million). Platí tedy, že

$$10\,000\text{ ppm} = 1\text{ \%}.$$

Jsou toxické a jejich vypouštění do ovzduší – **emise** – je legislativně omezováno přísnými **emisními limity**.

Objemová koncentrace obecné škodliviny zjištěná v ppm X_{ppm} se převede na hmotnostní koncentraci v kilogramech na 1 m^3 spalín $X_{\text{mg/m}^3}$ při znalosti hustoty ρ v kg/m^3 měřené škodliviny, a to podle vztahu

$$X_{\text{mg/m}^3} = \rho \cdot X_{\text{ppm}} \quad [\text{kg/m}^3]$$

Hmotnostní koncentrace je vztažena na objem vzniklých spalín a je proto závislá na množství přebytku spalovacího vzduchu, který objem spalín navyšuje. Reálně zjiště-

ná koncentrace tak nevypovídá úplně o kvalitě spalovacího procesu, protože koncentrace škodliviny ve spalínách je „naředěna“ přebytečným vzduchem. Pro porovnání kvality jednotlivých zařízení (při certifikaci, při kontrole již provozovaných zdrojů,...) je proto nutné přepočíst koncentraci na tzv. **referenční podmínky**, tedy na přebytek spalovacího vzduchu, který je charakterizován tzv. **referenčním obsahem kyslíku** ve spalínách, a který je pro daný typ zařízení typický. Přepočet se provádí podle vztahu

$$X_{ref} = X_{mg/m^3} \cdot \frac{21 - O_{2ref}}{21 - O_2} \quad [kg/m^3]$$

kde je

X_{ref} je hmotnostní koncentrace přepočtená na referenční obsah O_2 v mg/m^3

X_{mg/m^3} hmotnostní koncentrace reálně zjištěná v mg/m^3

O_{2ref} referenční obsah O_2 ve spalínách v %

O_2 reálně zjištěný obsah O_2 ve spalínách v %

Pro teplovodní kotle na tuhá paliva malých výkonů je například referenční obsah O_2 dle [7] stanoven na 10 %. Pro kotle na biomasu uváděné na trh v Německu je referenční obsah dokonce 13 %. Německé limity vypadají přísněji, nicméně je nutné si uvědomit, že při vyšším referenčním obsahu jsou spaliny více naředěny, a proto i přepočtená hodnota škodliviny nižší. Přebytek kyslíku 13 % je brán jako typický pro kotle na biomasu obecně, protože převládající kotle na spalování kusového dřeva spalují s vyšším přebytkem. Jak již víme, pro peletové kotle by měla být referenční hodnota O_2 spíše 8 %.

Popišme si nyní krátce jednotlivé základní složky spalín.

- **O_2 a CO_2** . Kyslík a oxid uhličitý jsem zařadil do společné „škatulky“, protože velikost jejich objemů ve spalínách spolu úzce souvisí. Spalovací vzduch obsahuje 21 % kyslíku. Pokud by se veškerý kyslík spotřeboval na dokonalé spálení veškerého uhlíku v hořlavině, ve spalínách by se objevilo 21 % CO_2 . Ale část jej „spotřebují“ na svoji oxidaci ostatní spalitelné složky paliva (síra, vodík) a proto je ma-

ximální teoreticky dosažitelná koncentrace CO_{2max} nižší. Závisí to na prvkovém složení paliva, pro běžnou dřevní hmotu se hodnota CO_{2max} pohybuje okolo hranice 20 %. Nedokonalým spálením uhlíku se koncentrace CO_2 ve spalínách nadále snižuje. Čím nižší tato koncentrace je, tím nižší je účinnost spalování. Kyslík, který se objevuje ve spalínách, částečně souvisí s přebytkem spalovacího vzduchu, částečně se jedná také o nevyužitý kyslík v důsledku nedokonalosti spalování. Se snižujícím se podílem CO_2 se tedy ve spalínách zvyšuje podíl kyslíku. Jejich vzájemný vztah lze u tuhých paliv vyjádřit zjednodušenou rovnicí pro přebytek spalovacího vzduchu

$$n = \frac{CO_{2max}}{CO_2} = \frac{21}{21 - O_2}$$

čehož využívá většina analyzátorů spalín. Z naměřené koncentrace O_2 a zvoleného CO_{2max} (navolí se v analyzátoru před měřením) se vypočítá koncentrace CO_2 . Podmínkou je však správně zvolené referenční CO_{2max} , protože jak jsem již uvedl, každé palivo má tuto hodnotu jinou. Pro zemní plyn je referenční CO_{2max} dokonce pouze 11,8 % a vypočtený kyslík je potom zcela jiný! Pro kontrolu lze použít jednoduché pravidlo: **součet $CO_2 + O_2$ vyhodnocených analyzátozem, by se měl řádově blížit CO_{2max} , u dřevní hmoty by se měl tedy pohybovat okolo hodnoty 20 %**. Jak již víme, průměrná provozní koncentrace CO_2 ve spalínách se u peletových kotlů pohybuje na hranici 12 %.

- **CO.** Koncentrace oxidu uhelnatého ve spalínách se kontroluje ze dvou zásadních důvodů. Jako jedovatý plyn patří mezi znečišťující látky a jeho emise jsou tedy přísně limitovány. Jak ale také víme, tento oxid vzniká v důsledku nedokonalého spálení uhlíku a míra jeho množství tedy udává také míru nedokonalosti spalování. U peletových kotlů je koncentrace CO ve spalínách hlavním kritériem při stanovování tzv. **ztráty plynným nedopalem**, tedy ztráty vzniklé právě neúplným vyhořením spalitelných plynných složek paliva. Při kvalitním spalování dřevních pelet se objemová koncentrace CO pohybuje v rozmezí 50 – 500 ppm, opravdu špatně seřízený kotel emituje do 3000 ppm.

Dle [7] lze objemovou koncentraci převést na hmotnostní koncentraci dle následujícího vztahu

$$CO_{mg/m^3} = 1,25 \cdot CO_{ppm}$$

- **NO_x**. Směs oxidu dusnatého NO a oxidu dusičitého NO₂, souhrně označená jako NO_x, je další sledovanou znečišťující látkou, i když pro malé zdroje tepla spalující tuhá paliva pro ně ve většině zemí EU neplatí emisní limity. Existují tři základní mechanismy vzniku těchto oxidů a na jejich tvorbě se podílejí jak dusík obsažený ve vzduchu, tak dusík obsažený v palivu. Dusík je inertní (netečný) plyn a za podmínek obvyklých v ohništi peletového kotle reaguje s kyslíkem pouze nepatrně. Proto v těchto kotlích koncentrace NO_x ve spalínách nepřesahuje hodnotu 200 ppm a mechanismy tvorby této škodliviny se tedy nebudu podrobněji zabývat (něco jiného je to u spalování rostlinných pelet, které mají vysoký podíl palivového dusíku a i díky horší stabilitě hoření při jejich spalování vzniká podstatně více tzv. palivových oxidů dusíku a celkový podíl NO_x je až 1000 ppm). Podobně jako u oxidu uhelnatého, lze objemovou koncentraci z ppm převést dle [7] na hmotnostní dle vztahu

$$NO_{X\ mg/m^3} = 2,05 \cdot NO_{X\ ppm}$$

- **OGC**. Část nespáleného uhlíku se podílí na tvorbě celé řady uhlovodíkových sloučenin, které tvoří tzv. organické složky spalín. Důležité pro jejich vznik jsou teplotní podmínky i přítomnost různých reagentů v palivu. V odborné literatuře je suma těchto organických látek označována různě (TOC, THC, ΣC_xH_y), v normě pro malé teplovodní kotle na tuhá paliva [7] je pro ně použito označení **organický plynný uhlík OGC (Organic Gaseous Carbon)**. Část těchto látek patří mezi karcinogeny, proto je jejich emisím věnována stále větší pozornost. Zvláště při spalování biomasy s vyšším podílem palivového chloru (rostlinná) existuje nebezpečí vzniku dioxinů. Jak jsem již napsal, tyto organické sloučeniny vznikají z uhlíku, který „zůstal“ po nedokonalém spálení na CO. Proto čím nižší je podíl CO ve spalínách, tím méně je „k dispozici“ volného uhlíku pro tvorbu OGC, a o to nižší je ta-

ké množství vznikajících OGC. U peletových kotlů jejich koncentrace málokdy překročí hodnotu 50 ppm. Byl-li použit u analyzátoru jako cejchovní plyn propan, lze převod z objemové koncentrace na hmotnostní provést dle [7] následovně

$$OGC_{mg/m^3} = 1,64 \cdot OGC_{ppm}$$

- **TZL.** Tuhé znečišťující látky je souhrnný název pro tuhé částice, které jsou emitovány z ohniště spaliny do ovzduší. Jsou to jednak jemné částice popela ztržené z roštu primárním spalovacím vzduchem a odnášené proudem spalin, jednak saze, které se vysráží ve spalinách po prudkém ochlazení plamene jako důsledek nedokonalého spálení uhlíku. V současnosti jsou velkým problémem vzrůstající emise zvláště těch nejjemnějších frakcí TZL, označovaných jako PM_{2,5} a PM₁₀ (číslo v indexu označuje maximální velikost částic v μm) a proto se stále zpřísňují emisní limity pro TZL. Podle nejnovějších poznatků se tyto částice tvoří primárně ve spalovacích zdrojích, ale také sekundárně v atmosféře (tedy mimo spalovací zdroje) z tzv. prekurzorů (sloučeniny, které se účastní chemické reakce za vzniku jiné sloučeniny). A hlavním prekurzorem pro vznik sekundárních částic jsou NO_x, které se tak pravděpodobně významně podílejí na zvýšené koncentraci jemných prachových částic v ovzduší. To však není problém peletových kotlů, u kterých jsou emise TZL i NO_x velice nízké. TZL jsou zjišťovány v hmotnostní koncentraci a v běžných podmínkách se pohybují v hodnotách okolo 50 mg/m³.

Tuhé zbytky spalování

S palivem se do spalovacího procesu vedle hořlaviny dostávají také chemicky vázané minerály, tvořící jeho nehořlavou složku, nazývané **popelovinami**. V průběhu hoření se jednak z pelet uvolňuje prchavá hořlavina a vyhořívá uhlík vázaný v základní vrstvě paliva, jednak dochází také k chemickým reakcím minerálů v popelovinách a jejich přeměně na tuhý minerální zbytek – **popel**. Při nedokonalém spalování část uhlíku neshoří vůbec. Množství popela je tak navýšeno o **mechanický nedopal** (uhlík nevyhořelý z dřevěného uhlí) a **saze** (uhlík vysrážený v důsledku prudkého ochlazení již hořících částic uhlíku) a to vše se souhrnně nazývá **tuhé zbytky spalování**.

Množství vznikajících tuhých zbytků a schopnost odvádět je průběžně z ohniště významnou měrou ovlivňují kvalitu spalovacího procesu. Popel hromadící se na roštu postupně zamezuje přístupu primárního spalovacího vzduchu k základní vrstvě paliva a zpomaluje tak rychlost jejího vyhořívání. Nově přiložené palivo tak má „k dispozici“ méně tepla pro endotermickou fázi hoření, postupně se narušuje celá dynamika spalovacího procesu, který se časem může úplně zastavit. Patrné je to právě u malých peletových kotlů. Vzhledem k tomu, že palivo je do nich přikládáno průběžně po malých dávkách, mají také relativně malý rošt, který bývá „prošpikován“ otvory pro přívod primárního vzduchu. Kvalitní dřevní peleta má obsah popelovin okolo 0,5 % a mechanický nedopal je zanedbatelný, proto není problém vznikající popel ve formě jemného prášku doslova „vyfouknout“ primárním vzduchem z roštu do popelníku. Ovšem u většiny konstrukcí peletových hořáků nastane problém v okamžiku, kdy se začne spalovat peleta s přísadou různých nečistot (kůra, listí, hlína), která má obsah popelovin i 1,5 % a zpravidla i nižší výhřevnost. Na první pohled je nárůst obsahu popelovin zanedbatelný, zvláště ve srovnání s ostatními tuhými palivy (uhlí např. 5 – 20 %). Oproti čisté peletě je to ovšem třikrát více vznikajícího popela, navíc díky nižší výhřevnosti je zapotřebí dodávat více paliva. Během několika hodin provozu se rošt hořáku zaplní popelem tak, že se výrazně naruší účinnost spalování a kotel ztratí výrazně na výkonu. Bez zásahu obsluhy je hoření často přerušeno úplně. Jak jsme se již dozvěděli v prvním díle, popel z méně kvalitních pelet má větší tendence se tavit a vytvářet na roštu škváru, která vše ještě zhoršuje.

Ale tuhé zbytky spalování nemusí způsobovat problémy pouze na roštu. Část z těch, které jsou strženy a unášeny spalinami, ulpívá na stěnách kotlového tělesa a tvoří nánosy, které ovlivňují účinnost přenosu tepla ze spalin do teplotonosné látky (topné vody). Pokud se nánosy tvoří v zóně vysokých teplot, dochází k jejich „natavování“ na teplosměnnou plochu. V zóně nízkých teplot, kde dochází často k ochlazení krajních proudnic spalin a jejich částečné kondenzaci, vzniká nepříjemná lepivá směs kondenzátu s popílkem. I zde je pro zachování účinnosti celého procesu spalování nutné tuhé zbytky spalování průběžně odstraňovat.

Vzhledem k minimálnímu množství tuhých zbytků ze spalování dřevních pelet zde není zapotřebí uvádět žádný, ani přibližný bilanční výpočet.

Teplo

A na závěr kapitoly věnované teorii spalování pelet mi zůstává „vyrovnat“ se s teplem, kvůli kterému celé spalování probíhá. Teplo je tepelná energie sdělená mezi termodynamickou soustavou a okolím [1]. Pokud bereme jako termodynamickou soustavu spalovací zařízení, pak do celkové tepelné bilance soustavy musíme zahrnout vedle tepla soustavou „vyprodukovaného“ také teplo do soustavy vnesené palivem a vzduchem. Ale o tom se krátce zmíním až v kapitole věnované celkové účinnosti spalovacího zařízení. Nyní se zaměřím na teplo jako produkt spalování.

Potenciál množství tepla získaného spalováním je dán energií chemicky vázanou v palivu. Při dokonalém spálení hořlaviny se veškerá tato energie přemění na teplo. Při nedokonalém spalování část energie zůstane „vázána“ v nedopalu, část vzniklého tepla spotřebují endotermické chemické reakce. My jsme se již seznámili s nežádoucí oxidací vzdušného dusíku na oxid dusnatý, endotermicky se ale „přeměňují“ také některé popeloviny v palivu. Pokud tedy to vše vezmeme v úvahu, zůstane nám teplo, které termodynamickou soustavu zvanou spalovací zařízení může opustit. Odvod tepla ovšem nesmí probíhat chaoticky, i zde platí jisté zákonitosti. Příliš velký odběr tepla (topnou vodou, vzduchem) může ochladit spalovací komoru a zvýšit tak nedokonalost spalování. Zvláště u teplovodních kotlů je to problém špatně „ošetřené“ topné soustavy, kdy příliš nízká teplota vracející se vody dlouhodobě ochlazuje celý spalovací prostor a v kotli dochází vedle špatného spalování také ke kondenzaci spalin a vzniku agresivních kondenzátů.

Část tepla musíme „přenechat“ také spalinám. Teplé spaliny zajistí jejich dobrý odtah ze spalovací komory (a komínovým průduchem), příliš vysoká teplota spalin však již zbytečně zvyšuje ztráty. Zvláště při konstrukci spalovacích zařízení je nutné dimenzovat teplosměnné plochy tak, aby byla optimalizována teplota výstupních spalin. Ale to se již netýká problematiky spalování, nýbrž to souvisí s celkovou účinností zdroje tepla a o tom se více dozvíme v dalších kapitolách.

Příklad z praxe

Na závěr povídání o spalování uvádím výňatek z protokolu z certifikační zkoušky malého peletového teplovodního kotle Variant SL 12 A firmy Slokov, na kterém si můžeme v praxi demonstrovat to, o čem jsme si v této kapitole povídali. Záměrně jsem vybral protokol trochu atypický. Nejprve si všimněme rozboru paliva, kterým byly světlé dřevní pelety. Na první pohled zaujme nízký obsah popela. Naopak díky poměrně vysokým obsahům vodíku a síry je hodnota $\text{CO}_{2\text{max}}$ nižší než 20 %. Obsahy dusíku a síry na „hraně“ třídy A1 a mírné napékání popele během zkoušky signalizovalo, že pelety nebyly až tak úplně čisté. Nicméně pro spalování v malých kotlích byla jejich kvalita zcela dostačující.

Z tabulky „Pomocné hodnoty spalování“ můžeme vyčíst, že kotel spaloval s poměrně vysokým přebytkem spalovacího vzduchu. Při jmenovitém výkonu 12,5 kW byl násobek stechiometrického vzduchu 1,91, což odpovídá běžnému provoznímu rozptylu, i když při certifikaci (a tedy v laboratorních podmínkách) se spíše dosahuje hodnot nižších jak 1,5. Při sníženém výkonu 3,7 kW byl přebytek dokonce 2,44. Je to dáno tím, že v kotli byl použit univerzální retortový hořák, určený pro spalování celé škály tuhých paliv s diametrálně odlišnými vlastnostmi. Od kvalitních dřevních pelet třídy A1, katrových pelet tříd A2 a B, rostlinných pelet, až po drobné hnědé uhlí. Každé z těchto paliv má díky velkým rozdílům v podílu prchavé hořlaviny specifické požadavky na celkové množství spalovacího vzduchu a jeho přerozdělení na primární a sekundární část. Díky značnému rozdílu v obsahu popelovin má každé palivo také jiné požadavky na velikost základní vrstvy paliva a tím i velikost roštu. Výsledkem byl konstrukční kompromis, díky kterému není u žádného z těchto paliv dotaženo spalování k absolutní „dokonalosti“. Nicméně, jak je vidět z tabulky „Rozbor spalin“, bylo dosaženo špičkové úrovně emisí škodlivin, a jak uvidíme v další části protokolu (viz. kapitola o účinnosti peletových kotlů), bylo dosaženo i vysoké celkové účinnosti.

Z rozboru spalin je také patrné, že součet naměřených hodnot CO_2 a O_2 je skutečně na hranici 20 %. Vyšší obsah kyslíku ve spalinách (a tedy i nižší obsah oxidu uhličitého) je dán právě větším přebytkem spalovacího vzduchu. Z toho pramení také větší objem skutečně vzniklých suchých spalin.

Rozbor paliva

Druh paliva	dřevěné pelety			
Analytický ukazatel	Značka	Jednotka	Hodnota	Nejistota
Výhřevnost	Q_i	[MJ/kg]	17,15	0.14
Voda veškerá v původním stavu	W_t	[% hmot.]	7.61	0.03
Popel	A	[% hmot.]	0.16	0.01
Uhlík	C	[% hmot.]	47.05	0.25
Vodík	H	[% hmot.]	6.33	0.10
Dusík	N	[% hmot.]	0.29	0.10
Síra	S	[% hmot.]	0.031	0.001
Chlor	Cl	[% hmot.]	0.015	0.002
Kyslík dopočet do 100%	O	[% hmot.]	38.50	
CO ₂ max	CO _{2max}	[% obj.]	19.38	

Pomocné hodnoty spalování (tuhá paliva):

Datum zkoušky: Výkon:		jmenovitý	nejmenší
Druh paliva:		dřevěné pelety	dřevěné pelety
Stechiometrický objem kyslíku [m ³ /kg]		0.960	0.960
Stechiometrický objem vzduchu [m ³ /kg]		4.573	4.573
Stechiometrický objem suchých spalín [m ³ /kg]		4.485	4.485
Maximální objem CO ₂ [%]		19.39	19.39
Násobek stochiometrického vzduchu [-]		1.91	2.44
Objem suchých spalín skutečný [m ³ /kg]		8.734	11.174
Objem H ₂ O ve spalovacím vzduchu [m ³ /kg]		0.150	0.187
Objem H ₂ O ve spalínách [m ³ /kg]		0.947	0.984

Rozbor spalín:

Datum zkoušky: Výkon:		jmenovitý	nejmenší
Druh paliva:		dřevěné pelety	dřevěné pelety
Kyslík O ₂ [%]		10.12	12.52
Oxid uhlíčitý CO ₂ [%]		9.95	7.75
Oxid uhelnatý CO [ppm]		56	369
Vyšší uhlovodíky OGC [ppm]		20	38
Oxidy dusíku NO _x [ppm]		79	56

ÚČINNOST SPALOVÁNÍ A SPALOVACÍHO ZAŘÍZENÍ

Účinnost v podstatě udává míru využití potenciálu čehokoliv, co máme k dispozici. Je to ovšem veličina vždy relativní a je velmi důležité definovat podmínky, za jakých vše vyhodnocujeme a především, k čemu, k jaké velikosti, množství atd. ji vztahujeme. Některé na první pohled ztráty mohou být naopak ziskem pro větší stabilitu spalování a naopak. To si ukážeme v obecné rovině i na konkrétním příkladu v kapitole věnované peletovým kotlům. Pojdme tedy nejprve k termodynamice.

Obecná definice účinnosti

Máme dřevní peletu a v ní chemicky vázanou energii (výhřevnost). Účelem řízeného spalování je přeměna této energie ve spalovacím zařízení na energii tepelnou a její následné předání - buď přímo (gril, vařič, sporák), nebo dalšímu médiu (vzduch, voda, pára, olej). Nás zajímá vytápění, tedy druhá možnost. Obecně, z termodynamického hlediska, nám účinnost udává míru, s jakou je využit potenciál dodané energie, tedy

$$\eta = \frac{\text{energie získaná}}{\text{energie vložená}} ,$$

přičemž rozdíl mezi oběma energiemi nazýváme ztrátou.

Účinnost spalování

Pokud jsme si na úvod této knihy definovali spalování jako oxidační proces, při kterém je uvolňována energie chemicky vázaná v palivu, pak účinnost spalování vyjadřuje míru, s jakou se podařilo uvnitř spalovacího zařízení přeměnit tuto energii chemicky vázanou na energii tepelnou. Výši ztrát určuje množství nespálené hořlaviny v produktech spalování. Účinnost spalování nám v podstatě říká, jak kvalitně je konstruován spalovací prostor zařízení, ve kterém dochází k vyhořívání hořlaviny.

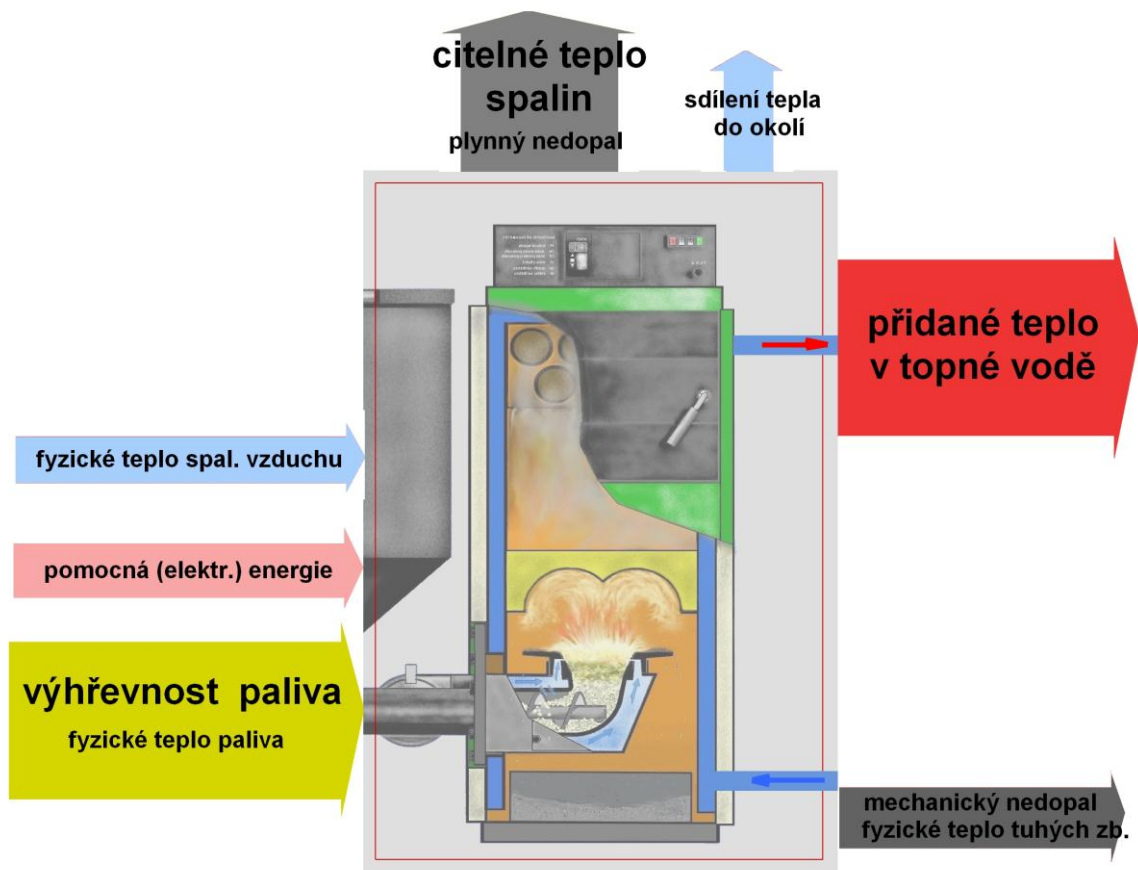
V praxi se však bohužel pojmem účinnost spalování označuje něco zcela jiného. Něco, co se spalováním v podstatě nesouvisí (viz. účinnost malých peletových kotlů).

Účinnost spalovacího zařízení

Vyjadřuje míru, s jakou se spalovacímu zařízení podařilo přeměnit energii do zařízení celkově dodanou - **příkon (P_P)**, na tepelnou energii předanou topnému médiu - **výkon (P_V)**. Ztrátami jsou v tomto případě veškeré formy energie, která „nepřešla“ do teplotnosné látky. Vedle ztrát nedopalem se jedná také o teplo, které bylo hořením z paliva sice uvolněno, ale nebylo předáno teplotnosné látce. Účinnost spalovacího zařízení nám říká, jak kvalitně je zkonstruováno toto zařízení jako celek, tedy jak účinně je palivo spáleno a vytvořené teplo následně účelně předáno k dalšímu využití.

$$\eta = \frac{P_V}{P_P}$$

Pro správné stanovení účinnosti spalovacího zařízení je důležité, abychom si přesně stanovili, co je myšleno pod pojmy tepelný příkon a tepelný výkon. K jejich definicím se v praxi přistupuje často různě. Je to závislé od velikosti zařízení a použité technologie spalování. Pro objasnění obecné definice si nyní pomůžeme tím, že si představíme spalovací zařízení (teplovodní peletový kotel) jako zjednodušenou termodynamickou soustavu. Mezi soustavou a okolím dochází pouze k předávání energií, uvnitř soustavy probíhá termodynamický děj – spalování (viz. obrázek).



Příkon – souhrn energií vstupujících ho soustavy

- **Energie přivedená palivem.** Je to jednak teplo „skryté“ ve výhřevnosti, ale teoreticky i fyzické teplo přímo akumulované v palivu, pokud je jeho teplota vyšší jak teplota okolí (což za běžných okolností nebývá).
- **Energie přivedená spalovacím vzduchem.** Podobně jako u paliva je to fyzické teplo přivedené spalovacím vzduchem. Pokud je vzduch nasáván přímo z okolí, je hodnota této energie nulová, někdy ovšem bývá předehříván odpadním teplem z jiných technologií, pak je tedy velikost této energie závislá na rozdílu teplot okolí a předehřátého spalovacího vzduchu.
- **Pomocné energie.** Donedávna byla jedinou pomocnou energií u malých spalovacích zařízení práce obsluhy při štípání, přikládání, či čištění, a to se věru velice špatně vyčísluje. U moderních zařízení však přibývá elektrických agregátů ne-

zbytných pro jejich provoz. Od pohonů šnekových dávkovačů paliva a ventilátorů, po automatické čištění teplosměnných ploch či odpopelňování. U peletových kotlů je to ale především zapalovací zařízení, které mívá nezřídka příkon podstatně vyšší než 1 kW. Zde se poprvé setkáváme s tím, jak je důležité nastavit pravidla pro stanovení míry účinnosti. Pokud přičteme spotřebovanou elektrickou energii (v kWh) k celkovému příkonu dodaného do zdroje palivem a z vyrobeného tepla vypočteme účinnost, vliv spotřebované el. energie sníží celkovou účinnost zdroje v desetinách procenta, u špatně nainstalovaného zdroje o pár procent. Ovšem pokud spočítáme cenu spotřebované elektrické energie a zahrneme ji celkových nákladů na vytápění, může nám „nákladovost“ vzrůst podstatně výrazněji (zvláště se vzrůstající cenou elektřiny). A nárůst bude patrnější s klesajícím výkonem zdroje, kdy příkon v elektrické energii je v podstatě stejný, ovšem příkon v palivu klesá a tedy vzrůstá podíl drahé „přidané“ energie.

Výkon – energie předaná teponosné látce

Topné medium vchází do spalovacího zařízení s jistou tepelnou energií, která je v zařízení navýšena o energii, kterou přes teplosměnnou plochu (výměník) medium získá z tepla uvolněného spalovacím procesem. Právě ono teplo dodané teponosné látce nám udává výkon zařízení. Důležité ale je, aby teplo bylo ze spalovacího procesu odebíráno ve správném množství a na správném místě. Nejintenzivnější přenos tepla je vždy v místě největšího teplotního rozdílu. U spalovacího zařízení by to tedy teoreticky mělo být ve spalovací komoře. Ale jak již víme, tady je teplota prostředí velice důležitá pro kvalitu a udržení procesu hoření a proto je zde odběr tepla nežádoucí. Teplosměnná plocha by tedy měla být umístěna až v místech, do kterých již nezasahuje plamen, tedy kde již nedochází k hoření. Proto ne vždy lze spalovat různé druhy tuhých paliv ve stejných zařízeních. Na úvod knihy jsem to demonstroval na prohořivacím kotli, který byl konstruován pro spalování koksu hořícího bez plamene, a ve kterém spalujeme dlouhým plamenem hořící dřevo. Ovšem problém se nemusí týkat pouze jednoduchých technologií spalování. V současnosti se k nám ve velkém začínají dovážet levné polské automatické kotle na uhlí. Ty jsou ovšem konstruovány pro spalování černého uhlí s podílem prchavé hořlaviny 20 %, které tedy hoří krátkým plamenem. Proto mají tyto kotle menší spalovací komoru. Pokud do nich přiložíme

uhlí hnědé s podílem prchavé hořlaviny až 50 %, dlouhý plamen při jeho vyhořívání se poměrně rychle ochladí o tepelně neizolované stěny kotlového tělesa a kotle spalují s extrémně vysokým plynným nedopalem a tedy i nízkou účinností.

Ztráty

- **Energie odvedená spalinami.** Tuto energii představuje hlavně energie označená jako **citelné teplo spalin**, což je teplo, které zahřáté spaliny odvedou kouřovým hrdlem z kotle do komína. Ztrátě způsobené únikem této energie do okolí říkáme **ztráta citelným teplem spalin q_A , nebo také komínová ztráta**. I když se jedná o ztrátu, je to ztráta do jisté výše „tolerovaná“, protože je nutná pro bezproblémové odvedení spalin ze spalovacího zařízení. Ve spalinách ochlazených na teplotu prostředí by již došlo ke kondenzaci vody a tím ke vzniku zpravidla nežádoucího kondenzátu. Zvláště u tuhých paliv obsahuje kondenzát různě agresivní roztoky kyselin, které narušují kolové těleso i stěny komínového průduchu, navíc je nelze jen tak odvést do kanalizace. Do vlhkosti vysrážené na stěnách se „nalepují“ saze a vzniklý povlak omezuje přenos tepla ze spalin do topného media, „zalepuje“ komín, v horším případě prostupuje dehtový kondenzát stěnou komínového průduchu do místnosti. Teplota spalin je také důležitým faktorem, který určuje velikost komínového tahu. Studený spalinami neprohřátý komín netáhne a nedostačkový odvod spalin může způsobit nestabilitu spalovacího procesu. Jak si uvedeme dále, komínová ztráta je ztrátou největší a předurčuje tak hlavně účinnost celého zařízení. Někteří výrobci kotlů ve snaze o maximální účinnost dimenzují výměníky tak, že „srážejí“ teplotu spalin na minimum. Papírově vysoká účinnost ale „funguje“ pouze při certifikaci při laboratorních podmínkách, kdy se během několika hodinového nepřetržitého provozu ověřují vlastnosti kotle, a lze nastavit optimální podmínky (během této krátké doby se vliv kondenzace neprojeví, požadovaný komínový tah zajistí odtahový ventilátor na zkušebním zařízení). V běžných provozních podmínkách pak tyto kotle vykazují daleko nižší účinnost a často mívají problémy se samotným spalováním. Zisk účinnosti na úkor komínové ztráty může znamenat nespokojeného zákazníka. Je proto nutné najít kompromis, kdy je teplota spalin ještě přijatelná pro optimální průběh hoření. Jak je to u peletového kotle se více dozvíme dále.

Spalinami je také odvedena energie chemicky vázaná ve spalinách - **plynný nedopal**. Jejím nositelem je oxid uhelnatý CO, který v sobě má ještě potenciál dohořet na oxid uhličitý CO₂ (a tím uvolnit ještě další teplo), ale „díky“ špatným reakčním podmínkám ve spalovacím zařízení (nízká teplota, málo kyslíku) mu to nebylo umožněno. Ztráta způsobená tímto únikem se nazývá **ztráta plynným nedopalem** q_B .

- **Energie odvedená tuhými zbytky spalování.** Nevyhořelý uhlík, obsažený v popelu a sazích, reprezentuje tzv. **mechanický nedopal** a jím způsobená ztráta je **ztráta mechanickým nedopalem** q_C .

Vedle něj se do této energie započítává také fyzické teplo odvedené „horkým“ popelem (pokud je vyšší jak teplota okolí) a takto způsobená ztráta je **ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků** q_E .

- **Energie odvedená plochou kotle do okolí.** Všechny plochy kotle, jejichž teplota je vyšší jak teplota okolí, do okolí „předají“ část tepla vytvořeného spalováním, čemuž se odborně říká **sdílení tepla do okolí** a na závěr tak tady máme **ztrátu sdílením tepla do okolí** q_D .

ÚČINNOST MALÝCH PELETOVÝCH KOTLŮ

V předešlé kapitole jsme se seznámili s obecnou charakteristikou problematiky účinnosti spalování a především spalovacího zařízení. Nyní se pokusím vše konkrétně demonstrovat na nejběžnějším malém spalovacím zdroji určeného pro spalování dřevních pelet - teplovodním kotli.

Na úvod krátká charakteristika peletových kotlů. Představují nejmodernější technologii spalování pevných paliv. Díky vysokému stupni řízení spalovacího procesu dosahuje jejich provozní účinnost k hranici 90 %. Kontrolovaný přísun paliva i spalovacího vzduchu umožňují plynulou regulaci výkonu v rozsahu 30 až 100 % výkonu jmenovitého, popřípadě pracovat dokonce i v režimu ON/OFF, podobně jako pracují plynové kotle. Tedy bez zásahu obsluhy se takovéto kotle samočinně spouští a vypínají, plynule mění svůj tepelný výkon v rámci regulačního rozsahu. Vysoké účinnosti je dosaženo také výrazným snížením teploty vypouštěných spalin (ve srovnání s jinými typy kotlů na pevná paliva), která však u některých konstrukcí peletových kotlů dosahuje až extrémně nízkých hodnot. Proč extrémně nízkých si uvedeme dále.

U teplovodních kotlů na tuhá paliva do výkonů 300 kW se účinnost oficiálně určuje dle normy ČSN EN 303-5 – Kotle ústředního vytápění na pevná paliva, s ruční nebo samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 300 kW - Terminologie, požadavky, zkoušení a značení [7]. Hlavní metodou stanovení účinnosti je tzv. **přímá metoda**, kdy je účinnost počítána z naměřeného tepelného výkonu kotle a příkonu energie dodaného palivem. Pomocnou metodou ověřování je potom **tzv. nepřímá metoda**, kdy jsou měření a výpočtem určovány jednotlivé již výše popsané ztráty, ze kterých je poté spočtena celková účinnost.

Přímá metoda

Stanovení účinnosti přímou metodou lze provést prakticky pouze v laboratorních podmínkách, protože je nutné přesně znát parametry paliva (výhřevnost, hmotnostní

tok paliva) a množství tepla předaného teplonosné látce v měřeném časovém úseku, který u kotlů se samočinnou dodávkou paliva trvá 6 hodin. Účinnost se ověřuje při jmenovitém výkonu (nejvyšší trvalý tepelný výkon) a minimálním výkonu, který nesmí být vyšší jak 30 % výkonu jmenovitého. Účinnost se pak dle [7] vypočte z následujícího vztahu

$$\eta = \frac{P_V}{P_P} = \frac{W \cdot c_W \cdot (t_W - t_E)}{B \cdot Q_N}$$

kde

P_V je tepelný výkon v kW

P_P tepelný příkon v kW

W hmotnostní průtok topné vody v $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ($\approx$ kolik kg vody proteče kotlem za 1 s = hodinový průtok/3600, hustota vody při 70 °C $\rho \approx 0,978 \text{ kg} \cdot \text{l}^{-1}$)

c_W střední měrná tepelná kapacita vody v $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (kolik tepla v J musíme dodat 1 kg vody, aby se její teplota zvýšila o 1 Kelvin (°C) – v tabulkách, pro vodu 70 °C teplou a normální tlak je $c_W \approx 4190 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

t_W výstupní teplota topné vody (z kotle) ve °C

t_E vstupní teplota topné vody (do kotle) ve °C

B hmotnostní tok paliva v $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ (kolik kg paliva shoří v kotli za sekundu = hodinová spotřeba / 3600)

Q_N výhřevnost paliva v $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (průměr u normální pelety tedy 17 100 $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Jak je tedy vidět, je pro tuto metodu nutné znát poměrně dost veličin, které jsou v běžné praxi (přímo u kotle v kotelně) těžko ověřitelné. Dále si můžeme všimnout, že do celkového příkonu je zahrnuta pouze energie přinesená do kotle výhřevností paliva. Předpokládá se, že spalovací vzduch i palivo jsou do kotle dodávány za teploty rovné teplotě okolního vzduchu (což je pro malé domovní kotelny logické) a rovněž není brána v úvahu fyzická teplota popela. Nezapočítává se však ani příkon pomocné elektrické energie. U kotlů s jedním spalínovým ventilátorem je to přirozené, protože jejich příkon je minimální. U automatických kotlů s několika pohony a elektrickým zapalováním to však již může mít vliv. V dalším textu se to pokusím popsat.

Nepřímá metoda

Přímá metoda nám dává poměrně přesný přehled o celkové účinnosti měřeného kotle. Ovšem nedozvíme se z ní v podstatě nic konkrétního o kvalitě samotného spalovacího procesu. K tomu nám slouží naopak nepřímá metoda. Pomocným měřením složení spalin, rozbořem popela a měřením povrchových teplot se výpočtem stanoví v předešlé kapitole definované ztráty a z nich se stanoví celková účinnost kotle. Také pro stanovení účinnosti touto metodou je nutné znát spoustu parametrů, které jsou za běžného provozu prakticky nezjistitelné. Protože však má být tato kniha praktickou pomůckou pro „topiče“ amatéry, pokusím se naznačit, jak by se za použití běžného analyzátoru spalin daly alespoň přibližně stanovit jednotlivé ztráty mimo laboratoř a zároveň se také pokusím zjistit, jaká je „udržitelná“ hranice účinnosti, tedy maximální reálně dosažitelná účinnost za předpokladu, že kotel ještě nepracuje v kondenzačním režimu. Takovýto zjednodušený postup výpočtu má zvláště u spalování dřevních pelet poměrně velkou vypovídací hodnotu. Jako palivo jsou pelety poměrně „čitelné“, tedy mají odhadnutelné parametry a peletové kotle jsou velice sofistikovaná spalovací zařízení se stabilním průběhem spalování, takže i míru emisí z nich lze s velkou přesností odhadnout.

Ztráta citelným teplem spalin

Ztráta citelným teplem spalin q_A , tedy komínová ztráta, je běžnými analyzátory spalin vypočítávána z tzv. Siegertova vztahu

$$q_A = (t_s - t_v) \cdot \left(\frac{A}{21 - O_2} + B \right) \quad [\%]$$

kde t_s je teplota spalin na výstupu z kotle ve °C

t_v teplota prostředí (spalovacího vzduchu) ve °C

O_2 naměřená koncentrace kyslíku ve spalinách v %

A a B konstanty, které pro dřevo mají hodnoty $A = 0,7$ a $B = 0,01$.

Analyzátor spalin tuto ztrátu vypočítává a lze ji tedy zjistit přímo na displeji (či ve výpisu z měření). Je to jediná ztráta, která je měřitelná v kotelně, proto s ní „pracuje“ legislativa v případech, kdy je nařízena kontrola malých kotlů.

Účinnost, stanovená se zahrnutím pouze této ztráty se paradoxně v legislativě (a bohužel i v topenářské praxi) nazývá účinností spalování. Ovšem po tom, co již víme je jasné, že ztráta citelným teplem spalin s účinností spalování nemá nic společného.

Nyní se pokusím určit minimální teoretickou hranici této ztráty. Doposud jsme při bilančních výpočtech počítali s tím, že běžný peletový kotel pracuje s průměrným provozním přebytkem vzduchu $n = 1,7$. Pokud chceme najít hranici špičkového peletové kotle, pak uvažujeme limitní hodnotu přebytku $n = 1,3$, tedy s koncentrací $O_2 \approx 4,8 \%$. Dle [7] je mezní teplotou spalin, při které ještě nedochází k jejich kondenzaci v komíně, teplota při jmenovitém výkonu $160 \text{ }^\circ\text{C}$ nad teplotou prostředí, tedy pro uvažovanou teplotu vzduchu $15 \text{ }^\circ\text{C}$ je to teplota spalin přibližně $175 \text{ }^\circ\text{C}$. Pokud je při certifikaci naměřená při jmenovitém výkonu teplota spalin nižší, musí výrobce dle normy v průvodní dokumentaci: „... uvést doporučení pro instalaci kouřovodu, které zajistí dostatečný tah a zabrání vzniku kondenzátu a sazení v celém komínu“. Pro tyto hodnoty pak lze odvodit mezní hodnotu komínové ztráty

$$q_A = (175 - 15) \cdot \left(\frac{0,7}{21 - 4,8} + 0,01 \right) = 8,5 \%$$

V normě citovaná limitní teplota spalin $160 \text{ }^\circ\text{C}$ nad teplotu prostředí je univerzální hodnotou pro tuhá paliva. Rozhodující je hodnota teploty rosného bodu spalin, která je závislá na kvalitě spalovacího procesu a složení paliva. Zvláště síra v palivu tuto hodnotu navyšuje. U uhlí může být teplota rosného bodu až $120 \text{ }^\circ\text{C}$, u dřeva je to přibližně $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Limitní hodnotou „nekondenzační“ teploty spalin je pro běžný peletový kotel cca $145 \text{ }^\circ\text{C}$. Při této teplotě tedy ještě u většiny komínů máme jistotu, že v jeho ústí (výstupu) nedochází ke kondenzaci spalin. Pro tuto teplotu můžeme tedy určit

limitní výši „nekondenzační“ komínové ztráty na 7 %.

V následující tabulce jsou uvedeny vypočtené hodnoty komínové ztráty pro různé teploty spalin a pro přebytky vzduchu $n = 1,3$ a $1,7$.

	125 °C	135 °C	145 °C	155 °C	165 °C	175 °C
$n = 1,3$	5,8	6,4	6,9	7,4	8	8,5
$n = 1,7$	7,3	7,9	8,6	9,2	9,9	10,6

Tabulku jsem uvedl proto, že je z ní vidět míra poklesu komínové ztráty (a tedy míra nárůstu účinnosti) s klesající teplotou spalin. Pro „běžný“ přebytek $n = 1,7$ se sníží ztráta z 10,6 % při teplotě 175 °C, na 7,3 % při teplotě 125 °C. Při poklesu teploty spalin o 50 °C je tak zisk na účinnosti 3,3 %, což v průměru znamená **rozdíl 0,66 % účinnosti na změnu teploty spalin o 10 °C**. Ovšem zisk je eliminován tím, že z bezproblémové teploty jsme se dostali na teplotu, která nám již „zaručuje“ kondenzaci v komínovém průduchu. Je tedy na zvážení, zda malá ztráta účinnosti není ziskem pro bezproblémový provoz. Jak jsem již uvedl v předešlé kapitole, při vyhodnocování účinnosti je nutné si nastavit optimální hranici.

Ztráta plynným nedopalem

Velikost ztráty plynným nedopalem je závislá na množství nespálené hořlaviny ve spalinách. V biomase je rozhodující spalitelnou složkou uhlík, proto je velikost plynného nedopalu závislá především na koncentraci CO ve spalinách. A zvláště u peletových kotlů je velikost ztrát plynným nedopalem zpravidla zanedbatelná. Ale abych dokázal, že je to doopravdy tak, opět provedu přibližný výpočet. Dle [6] platí pro ztrátu plynným nedopalem upravený vztah (pokud reálně předpokládáme dokonalé vyhoření vodíku)

$$q_B = 12,6 \cdot CO \cdot \frac{V_{SS}}{Q_N} \quad [\%]$$

Dosadíme-li za objem skutečně vzniklých suchých spalin V_{SS} vztah a hodnoty pro přibližný výpočet dle kapitoly o spalování dřevních pelet a pro výhřevnost paliva $Q_N = 17,1$ MJ/kg, pak lze rovnici upravit následovně

$$q_B = 12,6 \cdot CO \cdot \frac{V_{SS}}{Q_N} = 12,6 \cdot CO \cdot \frac{1,87 \cdot C^r}{(CO_2 + CO) \cdot 17,1} = 64 \cdot \frac{CO}{CO_2 + CO} \quad [\%]$$

Pro přebytek vzduchu $n = 1,7$ ($CO_2 = 11,8$ %) a průměrnou koncentraci $CO = 500$ ppm (0,05 %), získáme s velkou přesností hodnotu plynného nedopalu

$$q_B = 64 \cdot \frac{0,05}{11,8 + 0,05} = 0,27 \%$$

a pro špičkové parametry $n = 1,3$ ($CO_2 = 15,4$ %) a $CO = 0,01$ %

$$q_B = 64 \cdot \frac{0,01}{15,4 + 0,01} = 0,04 \%$$

Pro špičkové peletové kotle tedy můžeme počítat se ztrátou plynným nedopalem do 0,1 %.

Ztráta mechanickým nedopalem

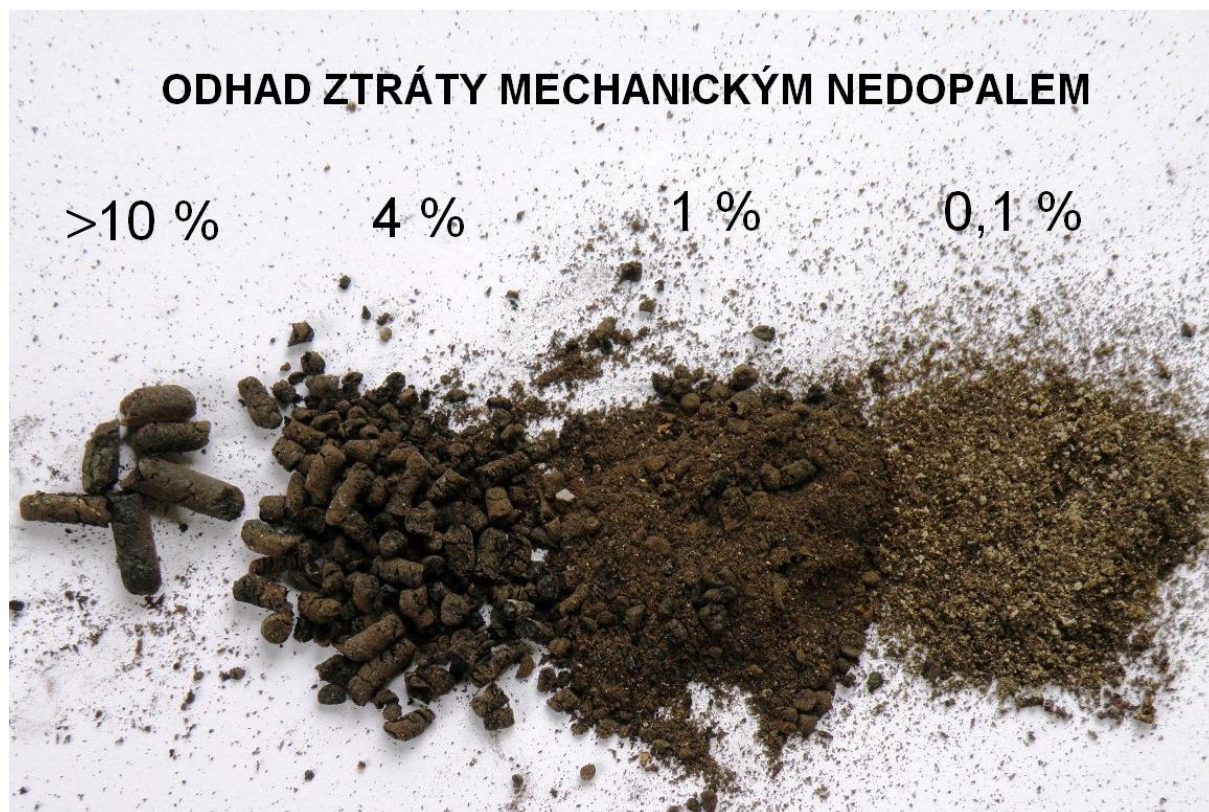
Pro stanovení této ztráty je nutné provést chemický rozbor popela a zjistit podíl nespáleného uhlíku v něm. Musíme také znát poměrné množství popela (kolik popela vzniklo z daného množství paliva). Tady se, podobně jako u plynného nedopalu, neobejdeme bez pomoci laboratoře. U správně seřízeného peletového kotle je však také mechanický nedopal minimální. Pro klid duše nicméně provedu i u této ztráty „kontrolu“ přibližným výpočtem.

Dle [6] pro ztrátu mechanickým nedopalem platí upravený vztah

$$q_C = 32,7 \cdot \frac{C_Z}{Q_N} \quad [\%]$$

kde C_Z je hmotnostní podíl uhlíku v pevných zbytcích spalování vztažený na jednotku paliva v %

Stanovit hodnotu C_Z u paliva, ve kterém se podíl popeloviny pohybuje pod 1 %, je pouhým pohledem na popel nemožné. Já se o to přesto pokusím a to díky tomu, že jsem absolvoval množství zkoušek při certifikacích kotlů, při kterých byly k dispozici také laboratorní rozbory. Pokud mi tedy uvěříte, pak mírou pro množství nespáleného uhlíku v popelu je jeho množství a charakter. Pokud popel obsahuje mnoho vůbec nespálených (světlých) pelet, nemá cenu v topení pokračovat a je nutné seřídít hořák (nebo vyměnit kotel). Pokud v popelu převažují zuhelnatělé černé pelety (drží tvar pelet), pohybuje se hodnota C_Z okolo 4 %, u tmavého popele s občasnými kousky černých pelet okolo 1 % a u jemného světlého popílku je to cca 0,1 % (viz. obrázek).



Vezměme tedy solidní průměr 0,5 % a výhřevnost 17,1 MJ/kg, pak po dosazení do vzorce získáme hodnotu ztráty

$$q_C = 32,7 \cdot \frac{0,5}{17,1} = 0,96 \%$$

Pro velice špatně spalující kotel ($C_z \geq 4 \%$) je hodnota nedopalu okolo 7 - 8 %. Je to relativně málo. Je ale nutné si uvědomit, že převážnou část hořlaviny obsahuje její prchavý podíl, který zuhelnatělá peleta již „vypustila“. Pro náš limitní výpočet (tedy úroveň ztráty špičkového kotle) vezměme tedy hodnotu $C_z = 0,1 \%$, pak zjistíme, že

u špičkového peletového kotle můžeme počítat se ztrátou mechanickým nedopalem do 0,2 %.

Ztráta sdílením tepla do okolí

Pokud jsem u předešlých ztrát vždy uvedl alespoň zjednodušený kontrolní výpočet, pak u ztráty způsobené únikem tepla z povrchu kotle do okolí si to netroufnu, protože i v laboratorních podmínkách je určování této ztráty často diskutabilní. Je to poměr tepla uvolněného povrchem kotle k tepelnému příkonu, závisí tedy na povrchové teplotě jednotlivých ploch. Vzhledem k tomu, že povrchová teplota konkrétního kotle se snižuje úměrně s jeho výkonem (tedy i příkonem), je při provozu na snížený výkon ztráta sdílením tepla do okolí vyšší než při výkonu jmenovitém. Zvláště výrazně se to projeví za běžného provozu například v případě, kdy kotel přejde z provozu na vysoký výkon do tzv. útlumového režimu. Tedy buď se jeho výkon výrazně sníží, nebo se na čas úplně odstaví. Povrch kotlového tělesa je provozem na vysoký výkon „nahřát“ a jeho teplota se snižuje poměrně pomalu. Ale příkon v palivu se razantně sníží, tedy ztráta sdílením tepla do okolí se i několikanásobně zvýší. Naproti tomu se výrazně sníží velikost ztráty citelným teplem spalin. Velice výmluvně to dokazuje záznam z certifikační zkoušky, který je uveden na konci této kapitoly.

Zde se tedy musíte spolehnout opět pouze na mé zkušenosti ze zkoušení kotlů a uvěřit mi, že **kvalitně zaizolovaný peletový kotel vykazuje při ustáleném provozu ztrátu sdílením tepla do okolí q_D na hranici 2 % a u špičkově zaizolovaného kotle se tato ztráta pohybuje do 1 %.**

Reálná provozní účinnost peletového kotle

Na základě předešlé rekapitulace jednotlivých ztrát mohu konečně doložit, jak jsem se dopracoval k hodnotě reálné provozní účinnosti peletového kotle, se kterou v této knize (i v předešlém dílu) pracuji, tedy s hodnotou 88 %. Celkovou účinnost kotle stanovenou nepřímou metodou se zahrnutím jednotlivých ztrát získáme ze vztahu

$$\eta = 100 - q_A - q_B - q_C - q_D [\%]$$

a po dosazení výše spočtených jednotlivých ztrát pro běžný kotel

$$\eta = 100 - 8,5 - 0,3 - 1 - 2 = 88,2 \%$$

pro špičkový peletový kotel, pokud předpokládáme, že spaliny z něj odcházející nezkondenzují v komínovém průduchu

$$\eta_{TOP} = 100 - 7 - 0,1 - 0,2 - 1 = 91,7 \%$$

Další zvyšování účinnosti lze provést pouze na úkor snižování teploty spalin pod kritickou hranici (již víme, že snížení "komínové" teploty o 10 °C znamená zvýšení účinnosti pouze o 0,6 – 0,7 %). Takový zásah vyvolá nutnost úpravy komína na kondenzační provoz a především nutnost zajištění nuceného odvodu spalin do komína pomocí odtahového ventilátoru a tedy i jemu odpovídající spotřebu elektrické energie. Dále je nutné si uvědomit, že výrobcem deklarované teploty spalin platí pro jmenovitý výkon kotle. Se snižujícím se výkonem klesá teplota spalin, takže u „před-

menzovaných“ kotlů je běžné, že při sníženém výkonu je jejich teplota spalin již na výstupu z kotle na hranici kondenzace. To je také jeden z důvodů, proč by i peletové kotle měly být zapojeny do topného systému s akumulací nádrží, aby pokud možno po nejdelší dobu „pracovaly“ na ustálený výkon blízký se výkonu jmenovitému.

Každý kotel má svoji charakteristickou **výkonovou křivku**, tedy závislost účinnosti na výkonu. U peletových kotlů se nejvyšší účinnost zpravidla pohybuje v rozmezí výkonů 70 – 100 % výkonu jmenovitého. A to je další z důvodů, proč by měly být tyto kotle zapojeny s akumulací nádrží, aby pokud možno po delší dobu „pracovaly“ v optimálním režimu. Jedná se o klasický střet s ekonomikou, kdy je na uživateli, zda se nechá projektantem přesvědčit na dražší instalaci s akumulací, či si zvolí provoz s nižší účinností a potenciálními problémy s komínem.

Naproti tomu uvedené výpočty ztrát platí pro ideálně vyčištěný a seřízený kotel. Při zaneseném výměníku se běžně teplota spalin navýší o 40 - 60 °C a vzrůstá tak komínová ztráta o 3 – 4 %. Špatně seřízený hořák nebo nevhodné palivo, za které lze pro většinu technologií spalování považovat i nejběžněji užívané katrové (hnědé) pelety místo bílých, znamená zvýšení ztrát plynným i mechanickým nedopalem. Protože jak jsme se již dříve dozvěděli, větší množství popela a jeho případné spékání na roštu postupně omezuje přístup primárního spalovacího vzduchu k palivu (více si o tom povíme v následující kapitole věnované konstrukci hořáků).

Vliv spotřeby elektrické energie

Jak jsem již uvedl, při ověřování účinnosti malých teplovodních kotlů se do celkového příkonu nezapočítává pomocná energie, kterou je elektrická energie spotřebovaná na pohon dávkovačů paliva, ventilátorů a automatického zapalování (odpopelňování, automatické čištění,...). Pro objektivní posouzení se tedy pokusím zjistit vliv spotřeby pomocné elektrické energie na celkovou účinnost kotle. Její velikost je závislá na konstrukci kotle. „Demonstraci“ provedu na kotli s retortovým hořákem Licotherm AM 24, který jako jeho konstruktér dobře znám. Jedná se o kotel s jedním šnekovým podavačem paliva o příkonu pohonu 40 W a jedním ventilátorem o příkonu 60 W. Hořák nemá elektrické zapalování. Jmenovitý výkon kotle je 24 kW, ale běžný průměrný

výkon 70 % jmenovitého - cca 16 kW. Při tomto výkonu a účinnosti 88 % tak kotel spálí 3,8 kg pelet za hodinu (výhřevnost 4,8 kWh/kg). Konkrétní podavač je schopen dopravit v nepřetržitém provozu do hořáku 14 kg pelet za hodinu, na dopravu 4 kg potřebuje tedy 16,3 minuty. Průměrný příkon elektrické energie na podání paliva a pohon ventilátoru je tedy

$$P_E = P_{pod} + P_{ven} = \frac{16,3}{60} \cdot 40 + 60 = 71 \text{ W} = 0,071 \text{ kW}$$

a celková účinnost je potom

$$\eta = \frac{P_V}{P_P + P_E} \cdot 100 = \frac{16}{3,8 \cdot 4,8 + 0,071} = 87,4 \%$$

což znamená snížení původní účinnosti $\eta = 88\%$ o ztrátu $q_E = 0,6 \%$.

Ztráta vlivem spotřeby pomocné energie je tedy u tohoto kotle vyšší, než ztráta plyným nedopalem. A to se jedná o nejjednodušší model s jediným motorem pro dodávku paliva a jediným ventilátorem.

Podobné výsledky získáme u peletových hořáků s automatickým zapalováním při akumulacním provozu (topná soustava s akumulací nádrží). I když je příkon elektrického zapalovače zpravidla vyšší jak 1 kW, při tomto provozu se hořák zapaluje jen několikrát denně, a jeden cyklus zapalování trvá 3 až 5 minut, takže spotřeba pomocné elektrické energie je zanedbatelná. Situace se ovšem může rapidně změnit, pokud je kotel zapojený do topného okruhu bez akumulací nádrže. Vezměme si poměrně běžnou situaci. Kvalitně zateplený objekt řízený špičkovou regulací. V nočních hodinách je snížen nárok na potřebu tepla dodávaného do objektu, kotel pracuje stejně jako plynové kotle v režimu ON/OFF, tedy chvíli topí, poté jej pokojový termostat „odstaví“ a opět po několika minutách zase zapne. Každé opětovné uvedení do provozu je spojeno se zapalováním na dobu cca 4 minuty. Předpokládejme mírnější variantu 2 zapálení za hodinu, příkon zapalovače 1 kW a průměrný hodinový

výkon kotle 5 kW (v tomto režimu jsem provozoval přibližně rok švédský trubicový hořák). Potom příkon v pomocné energii

$$P_E = \frac{2 \cdot 4}{60} \cdot 1 = 0,13 \text{ kW}$$

a účinnost

$$\eta = \frac{P_V}{P_P + P_E} \cdot 100 = \frac{5}{\frac{5}{0,88} + 0,13} = 86 \%$$

Znamená to tedy snížení účinnosti o 2 %. Zapalovače ve formě horkovzdušných „pistolí“ mívají příkon zpravidla 1,5 kW (a více) a kdo má doma plynový kotel ví, kolikrát za hodinu kotel „startuje“

Nechci tedy čtenáře zatěžovat dalšími výpočty, ale při ceně pelet 5 Kč/kg a ceně elektřiny 4,7 Kč/kWh se v tomto modelovém případě podílí pomocná energie 10 % na celkových provozních nákladech kotle (zkuste si to spočítat jako domácí úkol).

Příklad z praxe

V kapitole „Spalování dřevních pelet“ jsem uvedl část protokolu z typové zkoušky malého peletového kotle. Nyní příkládám další část tohoto protokolu, která se věnuje právě vyčíslení ztrát. Při jmenovitém výkonu byla teplota spalin 134 °C, tedy na hranici „kondenzačního“ provozu, při minimálním výkonu se však již na výstupu z kotle blížila teplotě rosného bodu spalin. Výborné spalování opět demonstrovují minimální ztráty nedopalem, zvláště při jmenovitém výkonu (ztráty se zaokrouhlují na desetiny, proto jsou uvedeny minimální měřitelné velikosti ztrát nedopalem 0,1 %). Velice pěkně se dá na tomto protokolu demonstrovat problematika ztráty sdílením tepla do okolí. Zkouška totiž probíhala tak, že po cca 2 hodinách „zahřívacího provozu“ začalo 6 hodinové měření jmenovitého výkonu a poté se výkon snížil a proběhlo ověřování minimálního výkonu. Po úvodních 6 hodinách zkoušek na výkon 12,5 kW se povrch

kotle nahřál a z jeho povrchové teploty byla stanovena ztráta sdílením tepla do okolí solidních 1,7 %. Poté byl výkon snížen na 3,7 kW, ovšem teplota povrchu po předem zkušební na maximum dlouho neklesala. Povrchová teplota tedy byla jen o něco málo nižší, ale ztráta byla vyčíslena z poměru k podstatně nižšímu výkonu. Proto byla naměřená ztráta sdílením tepla do okolí při minimálním výkonu o více jak 3 % vyšší. Současně však při sníženém výkonu o více jak 3 % klesla ztráta citelným teplem spalin, takže výsledná účinnost byla srovnatelná. Účinnosti zjištěné přímou metodou se pouze nepatrně lišily od účinností zjištěných nepřímou metodou. Nepřímá metoda při zkoušení dle evropské normy [7] slouží právě k ověření přesnosti zkušebního zařízení při měření přímou metodou.

Průměrné naměřené a vypočtené hodnoty (tuhá paliva):

Datum zkoušky: Výkon:	jmenovitý	nejmenší
Druh paliva:	dřevěné pelety	dřevěné pelety
Jmenovitý tepelný výkon (udaný výrobcem) [kW]	13	13
Teplota spalin [°C]	134,1	76,7
Spotřeba paliva [kg/hod]	2,94	0,87
Teplota vstupní vody [°C]	60,7	63,0
Teplota výstupní vody [°C]	81,0	80,4
Teplota chladicí vody [°C]	15,9	17,4
Průtok chladicí vody [m ³ / hod]	0,1640	0,0480
Tah za kotlem [Pa]	25,0	13,0
Teplota prostředí [°C]	24,8	24,5

Vypočtené hodnoty - tepelná bilance

Datum zkoušky: Výkon:	jmenovitý	nejmenší
Druh paliva:	dřevěné pelety	dřevěné pelety
Ztráta citelným teplem spalin (kominová) [%]	8,4	5,0
Ztráta plynným nedopalem [%]	0,1	0,4
Ztráta mechanickým nedopalem [%]	0,1	0,1
Ztráta sdílením tepla do okolí [%]	1,7	5,1
Součet ztrát [%]	10,3	10,5
Účinnost - nepřímá metoda [%]	89,7	89,5
Tepelný příkon [kW]	14,0	4,2
Tepelný výkon [kW]	12,5	3,7
Nejistota stanovení tepelného výkonu [kW]	0,5	0,2
Účinnost – přímá metoda [%]	89,4	89,2
Výkon / jmenovitý výkon [%]	96,5	28,5

KONSTRUKCE PELETOVÝCH HOŘÁKŮ

Vývoj spalovacích zařízení na spalování pelet a především teplovodních kotlů, se posunul za posledních 15 let nebývale kupředu. Souvisí to samozřejmě s prudkým vývojem zájmu o dřevní peletu. Z počátku byly pelety pouze doplňkovým palivem pro již rozšířené kotle spalující dřevní štěpku. Ty ovšem představují technologie značně předimenzované pro samotné spalování pelet. Dřevní štěpka má velkou vlhkost a naopak malou výhřevnost a objemovou hmotnost. Proto je nutné dopravovat ji do spalovací komory značné množství. Dopravní cesty, tedy šnekové dopravníky mezi kotlem a zásobníkem, jsou dosti rozměrné a vyžadují pohony o velkých příkonech (500 W a více). Pro dosažení požadovaného výkonu je nutné spálit objemově podstatně více štěpky než pelet. Vlhká štěpka „spotřebuje“ více tepla na vysušení v ohništi a proto při jejím spalování dochází k velkému odběru tepla ze spalovací komory (tolik potřebného pro dostatečné dohoření hořlaviny). Naopak drobná peleta se dopravuje ze zásobníku do spalovací komory velice snadno, což klade menší nároky na velikost dopravních cest. Díky velké výhřevnosti a nižšímu obsahu popelovin stačí na její spalování podstatně menší rošty a menší spalovací komora.

Při vývoji peletových kotlů se postupně zdokonalovaly a optimalizovaly „štěpkové“ technologie. Komfort vytápění peletami se značně přiblížil komfortu vytápění plynem a i technologiemi a rozměry se peletové kotle těm plynovým přibližují. Vedle prvních kondenzačních se objevují i kotle závěsné. Paleta konstrukcí peletových kotlů je v současnosti již natolik pestrá, že jejich popis a rozbor by zabral samostatnou knihu. Tato kniha je však věnována teorii spalování dřevních pelet, proto se pokusím v základních rysech popsat alespoň nejdůležitější technologický uzel celého kotle, který tvoří jeho srdce, a tím je hořák. Ovšem i škála konstrukcí peletových hořáků je velice pestrá. Jejich členění lze nalézt v ČSN EN 15270 – Hořáky spalující pelety pro kotle malých výkonů – Terminologie, požadavky, zkoušení, značení [8]. Podle této normy se hořáky spalující pelety třídí podle **způsobů řízení** (dvoupolohové, spojitě, vícestupňové), **prostředků zapalování** (ruční, automatické elektrické, horkovzdušné,...), **vnějšího nebo vnitřního zásobníku paliva**, **tvary spalovací komory**, **monoblokového či jiného typu**. Toto třídění naznačuje, že podrobný technický popis a

výklad všech variant peletových hořáků je téma také na samostatnou knihu. Já se pro jednoduchost zaměřím na obecný popis principu spalování v těch nejrozšířenějších variantách.

Základní vrstva paliva

Tím rozhodujícím kritériem, podle kterého se peletové hořáky odlišují, je způsob, jakým je v nich vytvářena základní vrstva paliva a jak je k ní přiváděn primární spalovací vzduch. To rozhoduje, jak kvalitní (či spíše nekvalitní) peletu je hořák schopen dlouhodobě spalovat, jaký způsob zapalování je nutné zvolit, či jaký výkon je pro danou konstrukci limitní. S pojmem základní vrstva paliva jsme se již seznámili v kapitole věnované spalování pelet, ale pro větší přehled si znovu zopakujeme, že

základní vrstva paliva je množství nahořelého paliva (žhavých uhlíků), které umožní bezpečné zapálení paliva nově přivedeného.

Převedeno na spalování pelet, základní vrstvu v peletovém hořáku tvoří na roštu nahořelé pelety, které mají v sobě ještě tolik hořlaviny (většinou již jen pevný podíl), že jejich dohořením se uvolní dostatek tepla potřebného pro bezpečné zapálení nově přiložených pelet. Nové pelety se „zbaví“ prchavé hořlaviny a postupně se samy stávají základní vrstvou. Pro dohoření tuhého podílu je však nutné přivést k povrchu žhavých uhlíků ještě kyslík. Ten dodá primární spalovací vzduch. Původní základní vrstva postupně dohořívá na popel, v případě kvalitních dřevních pelet přesněji na jemný prášek. Právě způsoby přikládání nového paliva, přivedení primárního spalovacího vzduchu a odvedení tuhých zbytků spalování určují limity pro využití jednotlivých konstrukcí hořáků. Existuje mnoho možností, jak tyto jednotlivé „technologické uzly“ řešit a neustále se objevují způsoby nové. Proto je velice těžké provést nějaké přesné členění peletových hořáků, protože každý hořák představuje individuální kombinaci jednotlivých řešení. U některých spalovacích zařízení nelze dokonce ani mluvit o hořáku, protože tyto technologické uzly jsou přímo začleněny do konstrukce zařízení (peletová kamna). Způsob „nakládání“ se základní vrstvou paliva lze však popsat na obecných principech.

Provozní stavy peletových hořáků, způsoby zapalování

Na úvod si musíme definovat provozní stavy - režimy, ve kterých se hořák v průběhu provozu nachází.

- **Vypnuto.** Režim, kdy je regulace hořáku zcela vypnuta, kotel je odstaven z provozu. V hořáku není vytvořena žádná základní vrstva paliva.
- **Zapalování.** Je zapnuta regulace. V průběhu tohoto režimu se na roštu hořáku vytváří základní vrstva paliva - je přiloženo minimální množství pelet, které je ručně nebo pomocí zapalovacího zařízení zapáleno.
- **Provoz.** Regulace je zapnuta. Hořák spaluje na požadovaný výkon, to znamená, že je do něj dopravníkem řízeně dodáváno požadované množství paliva a ventilátorem spalovací vzduch. Na roštu se neustále obnovuje základní vrstva paliva.
- **Pohotovost (útlum).** Regulace hořáku je zapnuta, avšak není momentální poptávka po dodávce tepla. Je zastaven přísun paliva a spalovacího vzduchu do hořáku, ale regulace „čeká“ na vnější signál, že je opět potřeba obnovit provoz a začít s dodávkou tepla do otopné soustavy. Základní vrstva paliva buď zcela vyhoří, nebo se v průběhu tohoto režimu průběžně udržuje na minimální úrovni.

Mezi režimy Vypnuto a Provoz musí vždy proběhnout režim Zapalování. Podle nutnosti zásahu obsluhy kotle rozlišujeme dva způsoby zapálení základní vrstvy.

- **Ruční zapalování.** Jak již název napovídá, u tohoto způsobu zapalování je podstatná asistence obsluhy kotle. Po zapnutí regulace obsluha uvede do chodu dávkovač paliva do hořáku. Po přiložení dostatečného množství pelet je dávkovač vypnut a na pelety je zpravidla přidán pevný podpalovač (nebo třísky) a je zapálen. Jakmile takovýmto způsobem vznikne na roštu základní vrstva nahořelých pelet, obsluha přepne regulaci do režimu Provoz a spalování již probíhá automaticky pod „dohledem“ regulace. Pokud hořák s ručním zapalováním přejde do režimu Pohotovost, nesmí dojít v průběhu tohoto režimu k úplnému vyhoření základní vrstvy paliva, protože v takovémto případě by se pro další přechodu do re-

žimu Provoz musel znovu ručně zapálit, což je nemyslitelné (ke střídání režimů dochází několikrát za den). Proto je regulace takovýchto hořáků opatřena funkcí, která zajistí, že po určité době trvání útlumu dávkovač přiloží na základní vrstvu minimální množství nového paliva, které „rozfouká“ ventilátor a hořák po cca 2 minutách opět přejde do útlumu. Obvykle se této funkci říká **délka útlumového režimu**, což je na regulaci nastavitelný časový úsek, po jehož uplynutí dojde obnovení základní vrstvy paliva.

- **Automatické zapalování.** Zde název napovídá, že zapalování je plně pod kontrolou regulace hořáku a nevyžaduje zásah obsluhy. Regulace „nechá“ přiložit na rošt předem definované (nastavitelné) množství pelet a spustí zapalovač. U malých hořáků je to výhradně elektrické topné těleso. Vyjíměčně toto těleso zapálí pelety přímým kontaktem, u drtivé většiny zapalovačů ohřívá topné těleso vzduch, který je poté vháněn na zapalovanou vrstvu pelet. Pro rychlé zapálení musí mít vzduch teplotu alespoň 500 °C, aby se rychle uvolnila prchavá hořlavina, ale především aby se vzňal také pevný podíl hořlaviny. Regulace musí mít také kontrolu nad průběhem zapalování, aby je po zapálení základní vrstvy mohla ukončit. K tomu slouží hlavně **optické čidlo** (fotocela), které zaregistruje plamen, u některých konstrukcí **teplotní čidlo** ve spalínovém hrdle, které zaregistruje zvýšení teploty. To jsou pak signály k ukončení zapalování.

Dělení hořáků podle tvaru spalovací komory

Pokud mám provést alespoň elementární rozčlenění peletových hořáků, pak to nejzákladnější je podle tvaru spalovací komory. I když to není členění nejjednodušší, protože může existovat několik pohledů na to, jaký že to ta komora má vlastně tvar. Je důležité také oddělit od sebe pojmy spalovací komora hořáku a spalovací prostor (komora) kotle. Asi nejvýstižnější definice pojmu spalovací komora je dle mého názoru uvedena v [10]

spalovací komora je konstrukční část vymezující spalovací prostor (spalovací prostor je prostor, ve kterém dochází ke spalování paliva)

Tedy převedeno na hořák, ta konstrukční část hořáku, ve které probíhá primární spalování pelet (uvolnění a zapálení prchavé hořlaviny a dohoření pevného podílu) se nazývá spalovací komora hořáku. Zapálená plynná hořlavina pak dohořívá ve spalovacím prostoru spalovacího zařízení (kotle). Hořák a spalovací prostor zařízení jsou součástí spalovací komory zařízení.

- **Miskový hořák.** Pravděpodobně nejrozšířenější typ hořáků. Jedna z jeho možných variant je zobrazena na níže přiloženém barevném schématu. Spalovací komora má tvar misky, do které přepadávají pelety ze šnekového dávkovače. Dno „misky“ tvoří rošt, ve kterém jsou otvory pro přívod primárního vzduchu, v bočních stěnách je několik otvorů pro přívod sekundárního vzduchu. Pod roštem je umístěno tělísko elektrického zapalovače, které ve fázi zapalování ohřívá vzduch, který je obtéká. Průběh zapalování kontroluje fotocela. Na obrázku je pohled do spalovací komory kotle firmy Atmos s miskovým hořákem, který patří k absolutní špičce mezi hořáky této kategorie. Všimněte si množství žárobetonové vyzdívky ve spalovací komoře, která v ní zajišťuje vysokou teplotu a tím i podmínky pro ideální vyhoření plynné hořlaviny.

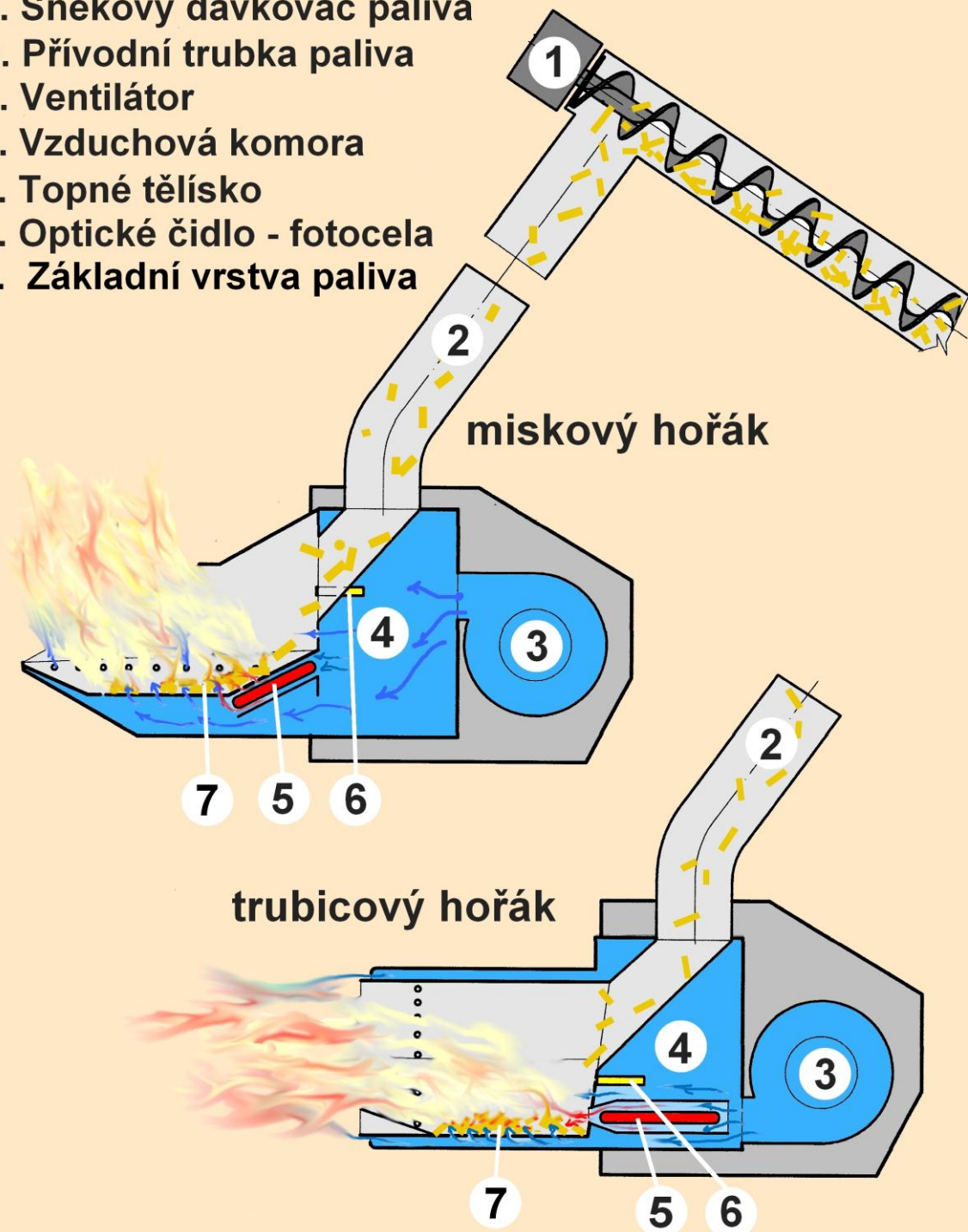


- **Válcový (trubicový) hořák.** Podobná konstrukce jako hořák miskový, ale spalovací komora má tvar válce. Ve spodní (roštové) části válce jsou opět umístěny otvory pro přívod primárního vzduchu, sekundární vzduch je pak přimícháván do plamene v ústí hořáku. V komoře pro rozdělení vzduchu (vzduchová komora) je opět umístěno žhavicí tělísko, které ve fázi zapalování ohřívá vzduch, který kolem něj obtéká a je v úzkém paprsku vháněn na přiložené pelety a vše opět kontroluje fotocela.



U obou těchto typů hořáku se předpokládá, že vzniklý popel je primárním vzduchem „odfouknut“ ze spalovací komory. Pro jejich správnou funkci je tedy nutné, aby jako palivo byly použity pelety třídy A1 dle [5]. Tedy čisté pelety bez příměsí kůry s nízkým obsahem popelovin (do 0,7 %) a vysokou teplotou deformace popela (nad 1200 °C). Pokud se spalují pelety horší kvality (A2, B), větší množství popela zaplní dno komory a případná struska vytvoří časem na roštu „škraloup“, který zcela zabrání přístupu primárního spalovacího vzduchu. Postupně mizí základní vrstva paliva, hořák ztrácí na výkonu, a pokud se napečence neodstraní manuálně, hořák časem vyhasne. Po přechodu hořáku do útlumového režimu základní vrstva na rozžhaveném roštu rychle vyhoří a i po několika minutách trvání útlumu musí být při opětovném startu znovu zapálena zapalovačem (topným tělískem).

1. Šnekový dávkovač paliva
2. Přívodní trubka paliva
3. Ventilátor
4. Vzduchová komora
5. Topné tělísko
6. Optické čidlo - fotocela
7. Základní vrstva paliva



- **Retortový hořák.** Tak trochu záhadný název „přejal“ tento typ hořáku od zařízení zvaného retorta, což je - velice zjednodušeně - uzavřená nádoba, ve které se „zplyňuje uhlí“ (díky retortám začala před více jak 200 léty plynofikace evropských měst). Retortové hořáky původně vznikly v počátcích průmyslové revoluce a byly využívány pro vytápění parních kotlů v lokomotivách. Někdy se jim také říká hořáky se spodním přikládáním paliva. Palivo je v nich dodáváno spočátku horizontálně šnekovým podavačem a v části hořáku zvané retorta (má tvar kolene) mění svůj směr pohybu a je vytlačováno vertikálně do spalovací části hořáku. Tím, jak se palivo ve vrstvě blíží k zóně spalování, se postupně zahřívá a začíná uvolňovat prchavou hořlavinu. Hořlavina prochází základní vrstvou paliva a po smísení se spalovacím vzduchem se nad roštem v dohořivací zóně zapálí. Vyhořelé zbytky jsou buď odfouknuty spalovacím vzduchem, nebo jsou vytlačeny novým palivem na kruhový rošt, který je nad retortou. Spalovací vzduch je vháněn do základní vrstvy paliva po stranách v horní části retorty (rozdmýchává ji podobně jako uhlí v kovářské výhni) a prochází jí. Kyslík nevyužitý pro vyhoření pevného podílu je již natolik přehřátý, že se bez problémů „zapojí“ do oxidace prchavého podílu hořlaviny v dohořivacím prostoru spalovací komory.

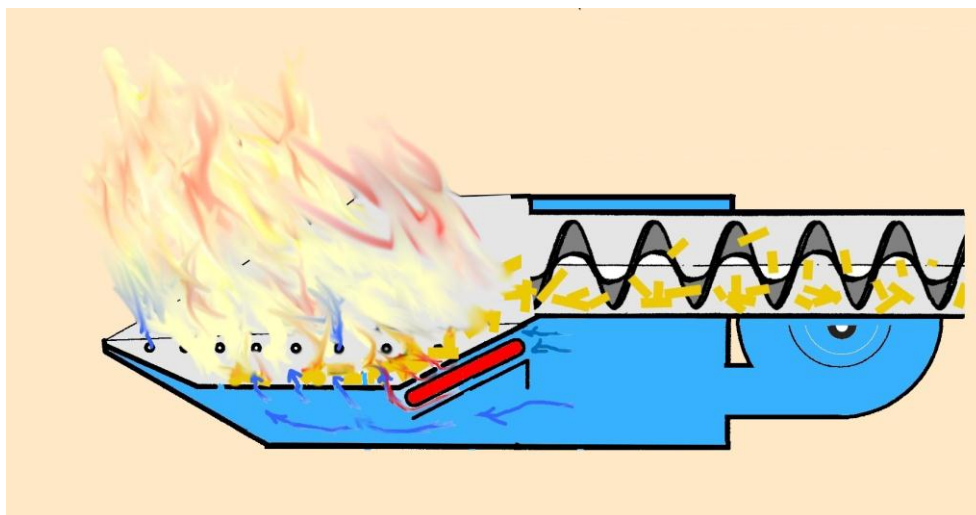


Díky tomu, že palivo uvolňuje prchavou hořlavinu v zóně zahřívání bez přístupu vzduchu, „odpyňuje“ se podobně jako uhlí v retortách při výrobě svítiplynu, proto ten název celého hořáku. Po přechodu hořáku do útlumu ustane přísun spalovacího vzduchu, základní vrstva se pomalu posouvá níže do retorty. Proto je nutné po nějaké době šnekovým dávkovačem vrstvu paliva (a tím i základní vrstvu) „posunout“ o něco výše. Po opětovném přechodu do provozního režimu pak stačí obnovit přísun spalovacího vzduchu a řízené doplňování paliva. Proto je tento typ hořáků vhodný pro spalování méně kvalitních pelet s velkým podílem popelovin a vysokou nákloností ke spékání. Popel a případná struska jsou totiž novým palivem (základní vrstvou) vytlačovány ze zóny hoření a neblokují tak přístup spalovacího vzduchu. Lze v nich proto celoročně spalovat pelety třídy A2 a B, popřípadě i pelety rostlinné. U příliš „spékavých“ pelet dochází časem k napékání popelovin na stěny retorty a tu je nutné po několika měsících provozu vyčistit. Neustálý kontakt základní vrstvy s peletami znamená zvýšené nebezpečí prohořívání do násypky paliva, což lze ale technicky vyřešit právě cyklickým posunem paliva v době útlumu. Oproti předešlým typům hořáků jsou retortové hořáky také mohutnější.



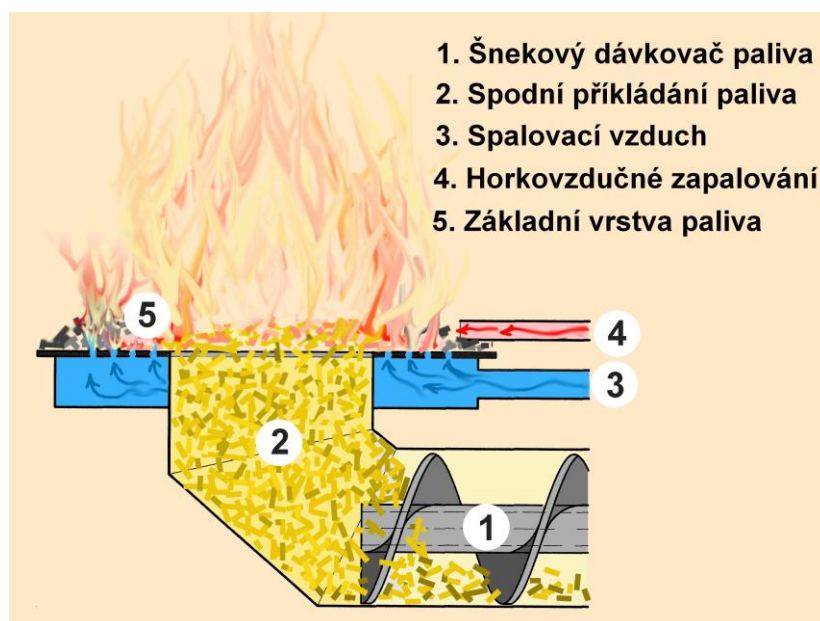
Vedle těchto základních konstrukcí hořáků existuje celá řada konstrukcí jiných a objevují se konstrukce stále nové. Poměrně úspěšně se začínají prosazovat trubicové hořáky s rotující spalovací komorou, které umožňují spalovat méně kvalitní spékavé pelety. Podél horizontální osy se pootáčející válcová komora neustále „uvolňuje“ otvory pro přísun spalovacího vzduchu a popel s napečenci se rotací postupně vytlačuje z komory ven.

Další poměrně rozšířenou variantou je kombinace miskového hořáku s horizontálním přísunem paliva. Jedná se spíše o jiné prostorové řešení, které ovšem u většiny variant neřeší spékavá paliva, protože při častém cyklování hořáku (zapínání a vypínání) se na roštu stejně objeví spečená vrstva popele, na kterou je přihrnováno stále nové palivo a postupně je zamezováno přístupu primárního vzduchu.

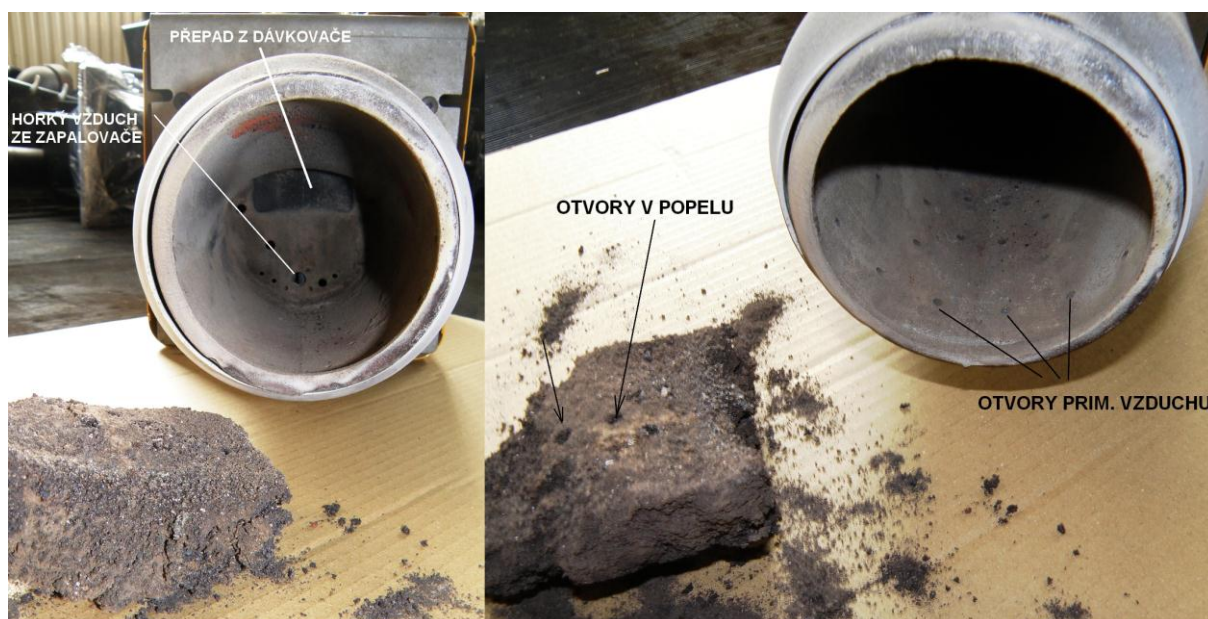


A ještě jedna velice rozšířená kombinace předešlých technologií. Hořák se spodním příkládáním paliva (často nazývaný také retortový, i když podle mého názoru a dle předešlého výkladu, s prapůvodní retortou již nemá tolik společného). U tohoto typu spalovací vzduch prochází základní vrstvou paliva, která se ale utváří na celé ploše horizontálně položeného kruhového roštu. Otvory pro přívod primárního vzduchu jsou právě v tomto roštu. Díky hoření na ploše roštu je omezeno nahořívání pelet v „kole-ní“ a tím se částečně eliminuje prohořívání paliva do násypky. Při spalování pelet horší kvality však opět může nastat problém s „ucpáním“ vzduchových otvorů v roštu. Nové palivo je v tomto případě přehrnováno přes zapečenou vrstvu a spaování je opět omezeno. To lze eliminovat tím, že na roštu jsou umístěna malá hrabla, která po

roštu pomalu rotují (podél svislé osy roštu) a případné napečence „shrabují“ do popelníku.



Na závěr přikládám dva obrázky, které dokumentují, jaké problémy mohou vzniknout při spalování méně kvalitních pelet. Nejdříve pohled na trubicový hořák po 3 dnech nepřetržitého provozu na jmenovitý výkon.



Spalovány byly „katrové“ pelety s podílem kůry a tedy s větším podílem popelovin a samozřejmě spékavějším popelem. Před hořákem je položena vrstva spečeného popela. Protože hořák pracoval na plný výkon a téměř se nevypínal, „nezapekly“ se otvory pro přívod primárního spalovacího vzduchu ve spodní části válce, ale vzduch si vymodeloval kanálky ve spečenci popela a ke kolapsu došlo až v okamžiku, kdy vrstva popela byla již tak vysoká, že doslova ucpala otvor, kterým přepadávaly pelety z dávkovače do spalovací komory.



A druhý obrázek ukazuje „útvár“, který jsem našel v popelníku kotle s retortovým hořákem po týdnu provozu tentokrát na minimální výkon (spaloval jsem opět katrové pelety). Je to až neuvěřitelné, ale tato obluda vznikala tak, že se v místech, kde končí retorta a začíná rošt, vytvořil zpočátku prstenec spečeného popela. Pokud je hořák v provozu, natavený popel je tekutý jako láva, ale po přechodu do útlumového režimu natavenina ztuhne. Po dalším spuštění hořáku se na již zatuhlou vrstvu prstence nabalovaly další a další vrstvy, které v útlumu opět ztuhly. Postupně tak vznikl „spečencový“ kanál, kterým procházel plamen a spaliny z hořáku. Jak narůstala jeho délka, pomalu se vlastní vahou začal deformovat a poté, co narostl do neuvěřitelné délky 40 cm, přepadl do popelníku. Díky vysoké teplotě uvnitř kanálu se popel natavil takovým způsobem, že vytvořil na jeho vnitřních stěnách tvrdý povlak ze skloviny.

DEFINICE VYBRANÝCH POJMŮ

Na závěr bych rád uvedl definice některých základních pojmů, které jsou spojeny s problematikami spalování v malých spalovacích zařízeních. Z velkého množství norem a učebnic jsem vybral jen některé definice, které jsou dle mého názoru nejvýstižnější, či nejzajímavější.

Začít musím ale tou nejkontroverznější.

Tuhá či **pevná paliva**? To je nekonečný spor mezi češtináři a energetiky. Podle jedněch je jasné, že pokud máme skupenství plynné, kapalné a pevné, pak i palivo musí být pevné, protože tuhé je jen to, co ztuhne (přejde ze skupenství kapalného do pevného), ale nato druhý namítne, že přece Slyšel jsem spoustu logických i méně logických argumentů a rozhodně se necítím být povolán vynášet zásadní soudy v tomto sporu. Co vím je, že již v roce 1927 ve svém slavném technickém průvodci nazvaném TEPLO, uvedli její autoři Felber a Hýbl (významní profesori ČVUT v Praze), že dříví, rašelina, uhlí hnědé a černé, brikety z hnědého a černého uhlí, kok a dřevěné uhlí, patří mezi paliva tuhá. Dodnes všechny technické normy zabývající se uhlím a produkty vyrobenými z něj a normy týkající se „velké“ energetiky, hovoří o tuhých palivech. A také nově přijaté evropské normy pro „pevná“ paliva z biomasy hovoří o tuhých biopalivech. Naproti tomu technické normy zabývající se malými zdroji tepla (lokální spotřebiče, teplovodní kotle) hovoří o spotřebičích na pevná paliva. Norma pro teplovodní a nízkotlaké parní kotle [6] pak povoluje oba pojmy.

Palivo – nosič energie určený ke konverzi na energii [9]

Hořlavina – spalitelná složka sušiny (sušina – materiál po odstranění vody za přesně stanovených podmínek) [9]

Prchavá hořlavina – ztráta hmotnosti při zahřívání za specifických podmínek bez přístupu vzduchu, opravená o obsah v palivu obsažené vody [9]

Neprchavý zbytek (pevně vázaný uhlík) – zbytek po odečtení obsahu vody, popela a prchavé hořlaviny [9]

Základní vrstva paliva – nejnižší vrstva hořícího pevného paliva, umožňující spolehlivé a bezpečné zapálení dalšího přivedeného paliva [6]

Popel – tuhý minerální zbytek získaný spálením paliva [9]

Spalování – řízená exotermní chemická reakce hořlavých složek paliva s kyslíkem [10]

Spaliny – plynné produkty spalování [10]

Suchý plyn (vzduch, spaliny) – plyn bez vodní páry [10]

Primární vzduch – spalovací vzduch, který se přivádí do vrstvy paliva nebo do proudu paliva a vystupuje ve směsi s palivem do spalovacího prostoru [10]

Sekundární vzduch – spalovací vzduch, který vstupuje do spalovacího prostoru a směšuje se s palivem v průběhu spalovacího děje [10]

Stechiometrický objem spalovacího vzduchu – objem suchého vzduchu potřebný k úplnému spálení jednotkového množství paliva [10]

Skutečný objem spalovacího vzduchu – objem suchého vzduchu skutečně spotřebovaný při spálení jednotkového množství paliva [10]

Násobek objemu spalovacího vzduchu – vztah skutečného objemu suchého spalovacího vzduchu ke stochiometrickému objemu spalovacího vzduchu [10]

Stechiometrický objem suchých spalin – objem suchých spalin teoreticky vzniklý úplným spálením jednotkového množství paliva se stochiometrickým objemem spalovacího vzduchu [10]

Skutečný objem suchých spalin – objem suchých spalin vzniklý spálením jednotkového množství paliva se skutečným objemem spalovacího vzduchu [10]

Skutečný objem vodní páry ve spalinách – objem vodní páry vzniklý spálením jednotkového množství paliva se skutečným objemem vlhkého spalovacího vzduchu [10]

Jmenovitý výkon – nejvyšší trvalý tepelný výkon stanovený výrobcem pro dané palivo [7]

Kotel s prohoříváním – kotel na pevné palivo, v němž probíhá postupné spalování a spaliny odcházejí přes vrstvu paliva [6]

Kotel s odhoříváním – kotel na pevné palivo, v němž probíhá spalování paliva ve vrstvě plynule doplňované, přičemž spaliny neprocházejí přes vrstvu paliva [6]

Ruční dodávka paliva – ruční dodávání paliva v intervalech záviselých na rychlosti hoření nebo na tepelném výkonu [7]

Samočinná dodávka paliva – samočinné dodávání paliva v závislosti na tepelném výkonu, může být prováděno průběžně nebo periodicky [7]

Ohniště – část kotle na pevné palivo skládající se z roštu a ze spalovací komory [6]

Rošt – součást kotle na pevné palivo určená ke spalování paliva ve vrstvě, popř. k odstraňování pevných zbytků spalování z ohniště [6]

Spalovací prostor – prostor, ve kterém probíhá spalovací děj [10]

Spalovací komora – konstrukční část vymezující spalovací prostor [10]

LITERATURA

- [1] Sazima M., Kmoníček V., Schneller J.: Teplo, SNTL, Praha, 1989
- [2] Lyčka Z.:Dřevní peleta–peleta mýtů zbavená, LING Vydavatelství , Krnov, 2011
- [3] Noskievič P.: Spalování uhlí, VŠB-TU, Ostrava, 1998
- [4] Ebert H-P.: Topení dřevem ve všech druzích kamen, HEL, Ostrava, 2007
- [5] ČSN EN 14961-2 Tuhá biopaliva-Specifikace a třídy paliv-Část 2: Dřevní pelety pro maloodběratele
- [6] ČSN 07 0240 Teplovodní a nízkotlaké parní kotle-Základní ustanovení, FÚNM, Praha, 2003
- [7] ČSN EN 303-5 Kotle pro ústřední vytápění-Část 5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční nebo samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 300 kW-Terminologie, požadavky, zkoušení a značení, ČNI, Praha, 2000
- [8] ČSN EN 15270 Hořáky spalující pelety pro kotle malých výkonů-Terminologie, požadavky, zkoušení, značení, ÚNMZ, Praha, 2010
- [9] ČSN EN 14588 Tuhá biopaliva-Terminologie, definice a popis
- [10] ČSN 06 1000 Lokální spotřebiče pevných, kapalných a plyných paliv-Termíny a definice, ČNI, Praha, 1994

