

ŘÍZENÍ MALÝCH KOTLŮ SPALUJÍCÍCH BIOMASU

Small-scale Biomass combustion proces control

Viktor Plaček, Stanislav Vrána, Jan Hrdlička

Abstrakt: Příspěvek si klade za cíl představit práci autorů ze dvou ústavů fakulty, která se zabývá řízením kotlů spalujících palivo na bázi biomasy v kotlích malých výkonů. Je popisována přestavba běžně dostupného 25kW kotle spalujícího dřevní peletky na experimentální základu, která umožňuje podrobné sledování a řízení spalovacího procesu. Je předkládáno řešení problému vzniku výrazných špiček emisí CO během roštování. Částečně je představena i podpora návrhu a kompletní zajištění automatizace kompaktního chladicího okruhu pro chlazení vody ohřáté během experimentů v laboratoři..

Key words: Biomasa, spalování, řízení, emise, chladicí okruh.

1. Úvod

Biomasa jako energetický zdroj tvoří v současné době více jak polovinu energie z obnovitelných zdrojů prakticky ve všech státech Evropské unie. Předpokládá se jak růst podílu obnovitelných zdrojů energie na celkovém energetickém portfoliu jednotlivých států, tak i pomalý růst poměru zastoupení biomasy na obnovitelných zdrojích [2, 3].

Používání biomasy jako paliva v tradičních malých zdrojích tepla má svou historickou tradici. Jde především o kamna, sporáky nebo krby spalující štípané nebo i špalkové dřevo. Spalovací proces je většinou neřízený, s použitím přirozeného tahu komína k dávkování spalovacího vzduchu. Tepelná účinnost (přeměna energie výhřevnosti na užitečné teplo) těchto zařízení je většinou nízká. Pohybuje se od extrémně nízkých -10% až 10% pro zděné otevřené krby až po 80% pro zplyňovací kotle [1]. Emise škodlivých plynů z těchto zdrojů tepla jsou velké a často při provozu překračují i emisní limity stanovené zákonem.

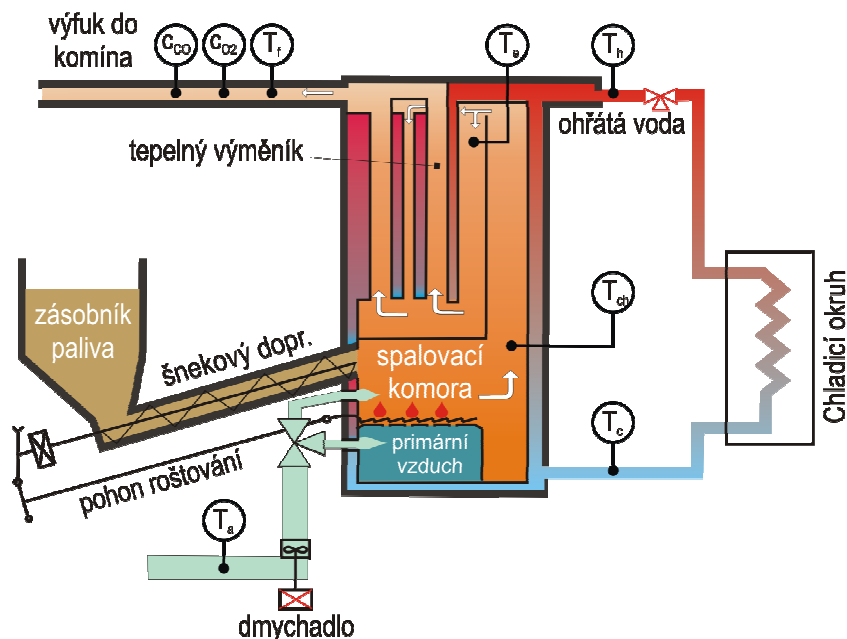
V rozvinutých zemích v současné době prožívají velký rozmach kotle automatické. Automatizace kotlů neznamená pouze výrazné snížení nutnosti obsluhy kotlů, ale také aktivní řízení spalovacího procesu, které umožňuje výrazné zvýšení tepelné účinnosti spalování a s tím i částečně související omezení vzniku škodlivých emisí. Tepelná účinnost těchto malých zdrojů se pohybuje v rozmezí 85% až 90% [1] a představuje tak finanční úsporu, která umožňuje návratnost poměrně vyšší pořizovací investice.

Řízení spalovacího procesu u kotlů malých výkonů je však zpravidla obtížnější než u kotlů průmyslových. Je to především z těchto důvodů:

- malé množství spalovaného paliva způsobuje rychlé změny spalovacího procesu a jeho vyšší citlivost na prováděné změny,
- kotle jsou obsluhováni neškolenými uživateli, kteří většinou zanedbávají i běžnou údržbu,
- senzory kotle ani teplosměnné plochy nepodléhají pravidelnému ověřování a kontrole [4],
- náklady na řídicí elektroniku jsou velmi omezené z důvodu celkově nízké ceny kotlů.

Předkládaný výzkum je prováděn v rámci výzkumného záměru MŠMT Rozvoj ekologicky šetrné decentralizované energetiky ve spolupráci ústavů Přístrojové a řídicí techniky a Mechaniky tekutin a energetiky.

2. Experimentální zázemí



Obr. 1: Schéma upraveného kotle a jeho připojení k chladicímu okruhu

Základem experimentálního zázemí je běžně na trhu dostupný kotel Verner A25G určený k centrálnímu vytápění rodinných domů. Kotel je konstruován ke spalování dřevních pelet nebo kukuřice. Při spalování dřevních pelet je jeho tepelný výkon 25kW. Tento kotel je dodáván s vlastní řídicí elektronikou určenou k bezobslužnému provozu kotle.

Zjednodušené schéma kotle je zobrazeno na Obr. 1. Do vrchní části spalovací komory kotle je šnekovým dopravníkem v pravidelných intervalech dopravováno palivo. Palivo ze šnekového dopravníku padá na pevný vodorovný rošt, kde odhořívá. Hořící palivo je po roštu posouváno směrem k popelníku pomocí roštovacího hřebene, který se v pravidelných intervalech vratně pohybuje v prostoru mezi roštnicemi. Odstředivý ventilátor dmýchá vzduch z části zespoda skrz rošt (tzv. primární vzduch) a z části do dyšen umístěných ve stěnách spalovací komory nad roštem (tzv. sekundární vzduch). Horké spaliny prochází tepelným výměníkem, kde předávají svou tepelnou energii vodě a odcházejí do komína.

Kotel je připojen k zázemí těžkých laboratoří ústavu Mechaniky tekutin a energetiky v Praze-Julisce. Kotel je primárně určen k výuce studentů a k testování energetických vlastností různých paliv na bázi biomasy (dřevní štěpka, obilniny, slaměné a senné pelety atp.). Pro účely provádění experimentů s řízením spalovacího procesu byla však původní elektronika nepoužitelná. Dovoľovala pouze omezené zásahy do procesu a to pouze ručním přenastavením.

Byl tedy navrhnout a vyroben vlastní rozvaděč obsahující elektrotechnické zázemí pro vlastní řídicí jednotku. Jde především o centralizaci signálů instrumentace, zajištění napájení a odrušení, ochrana proti zkratu, přetížení a nedovoleným stavům akčních členů, přepojení zpět na původní řídicí elektroniku, centrální zemění a nouzový stop. Kotel byl rozšířen o měření několika teplot, frekvenční měnič pro řízení vzduchového dmychadla a na výstup spalin byla osazena jednotka pro chemickou analýzu spalin.

Základem nové řídicí jednotky se stala měřicí a řídicí stanice RexWinLab-8000. Jde o PAC (Programmable Automation Controller) řady Wincon 8000, jehož firmware je však nahrazen řídicím softwarem REX Control vyvíjeným na katedře kybernetiky Západočeské university v Plzni. Tento řídicí software umožňuje návrh řídicího algoritmu na osobním počítači pomocí grafického prostředí podobného prostředí Simulink společnosti MathWorks. Takto navržený algoritmus je zkompileován a nahrán do paměti řídicího automatu, kde je již dále vykonáván bez potřeby osobního počítače. Je však možné zařadit do algoritmu v automatu blok, který přijímá a odesílá vybraná data pomocí Ethernetového rozhraní automatu do osobního počítače, kde je lze zpracovávat přímo v prostředí Simulink.

Po přestavbě a rozšíření instrumentace kotle je možné sledovat tyto veličiny:

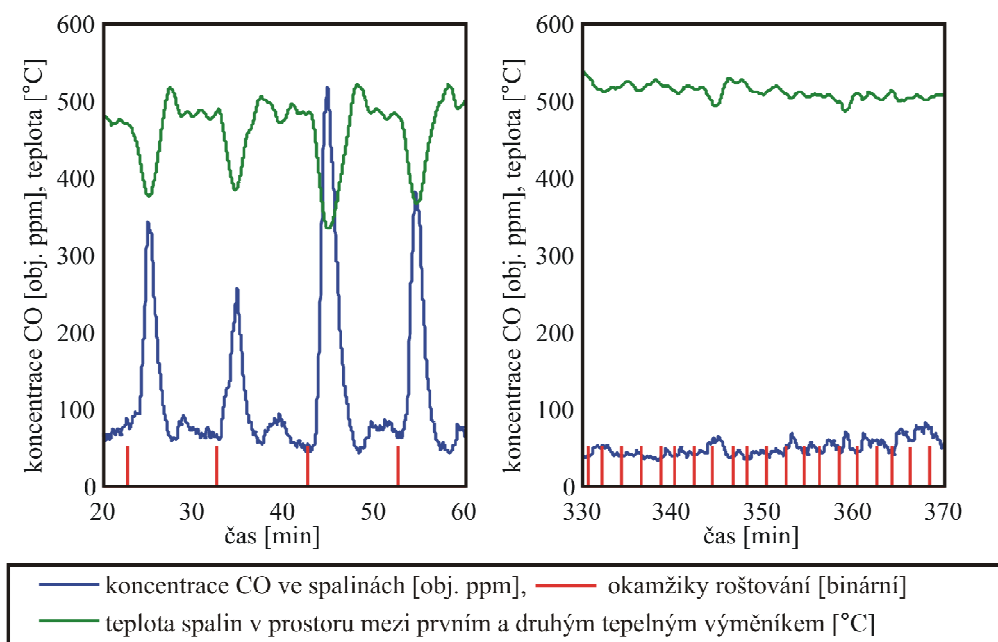
T_f	teplota spalin na vstupu do komína [°C],
T_e	teplota spalin mezi prvním a druhým tepelným výměníkem [°C],
T_{ch}	teplota spalin na výstupu ze spalovací komory [°C],
T_h	teplota vody na výstupu kotle [°C],
T_c	teplota vody na vstupu kotle [°C],
T_a	teplota dmychaného vzduchu [°C],
c_{CO}	koncentrace oxidu uhelnatého ve spalinách [obj. ppm],
c_{O_2}	koncentrace kyslíku ve spalinách [obj. %].

Pomocí řídicí jednotky lze ovládat délku a periodu přikládání, délku a periodu roštování, rychlost otáčení dmychadla spalovacího vzduchu a zatápění pomocí žhavicí spirály.

3. Průběh současných prací

Kromě již zmiňované funkce kotle k výuce odborných předmětů a testů spalovatelnosti biopaliv probíhá několik dalších projektů soustředěných na řízení spalovacího procesu. Je snaha o identifikaci procesu a vytvoření jeho modelu. Spalovací proces je rozdělen do dvou poměrně nezávislých částí. Do procesů probíhajících ve spalovací komoře a do procesů probíhajících v tepelném výměníku a komíně. Analytický model spalovací komory založený na popisu hoření pomocí kinetiky chemických reakcí se zdá být velice složitý a těžko realizovatelný. Z rešerší, principu i provedených měření je zřejmé, že jde o procesy komplexní někdy i s dopravním zpožděním, výrazně nelineární, časově invariantní a zatížené řadou neměřitelných prakticky náhodných poruch.

Jiný přístup k tvorbě modelu je využití fuzzy neuronových sítí. Pomocí této techniky bylo dosaženo poměrně uspokojivých výsledků pro vytvoření modelu dynamických závislostí některých veličin v některých provozních stavech kotle. Zdá se, že tato technika by mohla být cestou k modelování některých procesů i uvnitř spalovací komory. Bohužel, z takto vytvořeného modelu nelze získat žádné informace o principu dějů v kotli probíhajících. [6]



Obr. 2: Fluktuace CO ve spalínách a teploty spalin během roštování (vlevo: řízení tovární řídicí elektronikou, vpravo: po úpravě algoritmu roštování s vlastní řídicí jednotkou)

Souběžně jsou prováděny experimenty s řízením spalovacího procesu pomocí metod pracujících bez modelu. Byla provedena přibližná deterministická experimentální identifikace a na základě získaných dat vybráno několik ustálených pracovních bodů kotle. V okolí těchto pracovních bodů bylo použito regulace pomocí PID regulátorů. Jde o regulaci tepelného výkonu kotle pomocí změny intenzity přikládání a regulace koncentrace kyslíku ve spalínách pomocí změny množství dmýchaného vzduchu. Bylo použito několik metod pro získání parametrů PID regulátorů a provedeno několik experimentů. Bohužel, výsledky zatím nejsou uspokojivé.

Jedním z jevů pozorovaných při provozu kotle s původní řídicí elektronikou byly výrazné špičky v koncentracích emisí oxidu uhelnatého, ke kterým docházelo vždy po dobu několika minut po roštování (viz Obr. 2, vlevo). Původní elektronika prováděla roštování v desetiminutových intervalech s amplitudou chodu roštovacího hřebene 30 mm. Protože jsme předpokládali, že špičky koncentrace CO jsou způsobené výrazným mícháním paliva při roštování, zkrátili jsme periodu roštování na dvě minuty. Kvůli zachování rychlosti cesty paliva po roštu jsme proporcionálně ke zkrácení periody roštování zkrátili i amplitudu chodu roštovacího hřebene na 6 mm.

Ukázalo se však, že po delším provozu kotle dochází k hromadění paliva na roštu. Velikost amplitudy roštovacího hřebene se ukázala vlivem vůlí v roštovacím hřebenu příliš krátká. Po několika experimentech byla zjištěna délka chodu roštovacího hřebene zajišťující

původní rychlost cesty paliva po roštu 10 - 11 mm. Po úpravě roštovacího algoritmu a doladění mechanismu kotle fluktuace veličin spalovacího procesu prakticky vymizely (viz Obr. 2, vpravo).

4. Podpora návrhu a automatizace chladicího okruhu

Během prvních experimentů v těžkých laboratořích ústavu mechaniky tekutin a energetiky byla voda ohřívána při experimentech odebírána z veřejného vodovodního řadu a po ohřátí vypouštěna do kanalizace. Po rozhodnutí o rozšíření experimentálního zázemí laboratoře o kotel s tepelným výkonem 400 kW se tato praxe ukázala být velice nevhodnou. Bylo rozhodnuto, že pro účely experimentů bude vyroben chladicí okruh, který umožní ochlazení horké vody tak, aby mohla být opět použita.

Na základě předběžného návrhu vlastností chladiče v ustálených stavech byly navrženy základní parametry chladiče. Bylo rozhodnuto pro použití kompaktního uspořádání kontaktního chladiče. Chladič funguje na principu chlazení horké vody atmosférickým vzduchem. Horká voda je v horní části chladiče rozprašována na malé kapky, které padají svislou trubicí chladiče dolů a proti nim je dmýván chladný vzduch z okolí. Ochlazené kapky dopadají do zachytivé nádrže pod chladičem [7]. Během tohoto procesu však dochází k přímému kontaktu chladicího a chlazeného média a tím k výraznému nasycení vody vzduchem, který pak může při dalším použití ochlazené vody způsobovat problémy (např. korozi potrubí a výměníků, tvorbu vzduchových kapes atp.).

Za kontaktní chladič bylo tedy nutné zařadit odplynovač, který využívá sníženého tlaku nad hladinou vody ke snížení rozpustnosti vzduchu a tedy odplynění kapaliny. Rozšířením návrhu chladicího okruhu o vakuový odplynovač se však celý návrh značně zkomplikoval a vznikla celá řada otázek s fungováním chladicího okruhu, které nebylo možné na základě pouhé analýzy ustálených stavů zodpovědět.

Byl tedy navržen zjednodušený tlakoprůtočný fyzikální model, ze kterého byl vytvořen simulační model v prostředí Matlab/Simulink. Simulační model ukázal na celou řadu složitých procesů, ke kterým během provozu chladicího okruhu může docházet. Ukázalo se také, že některé prvky navrhovaného chladicího okruhu nemusí v některých situacích vhodně plnit svůj úkol. Příkladem je například regulační servoventil v potrubí na vstupu odplynovače. Simulace ukázala, že během nouzového odstavení chladicího okruhu, může vlivem malé rychlosti servomotoru ventilu dojít k přeplnění odplynovače, zatopení a tím k pravděpodobně destrukci poměrně nákladné vývěvy udržující v odplynovači vakuum.

K simulačnímu modelu byla vytvořena vizualizace v prostředí GEOVAP Reliance, která umožnila provádět virtuální experimenty na chladicím okruhu již ve fázi návrhu konstrukce. Návrháři okruhu tak měli možnost odhalit celou řadu problematických přechodových stavů, ke kterým dochází během rozběhu, doběhu popřípadě nouzové odstávce chladicího okruhu. Na základě simulací byla také navržena instrumentace okruhu a vybrán vhodný řídicí automat.

Chladicí okruh byl postaven a osazen navrženou instrumentací. Byl navržen a zkonstruován rozvaděč, který byl osazen PLC Tecomat Foxtrot-1015. Byl napsán a odladěn řídicí algoritmus a nahrán do PLC. Stejná vizualizace, která sloužila ke sledování virtuálních

experimentů nyní slouží po připojení osobního počítače k PLC k vizualizaci reálného provozu.

5. Závěr

Přestavba kotle Verner na experimentální základnu je dokončena a slouží k provádění celé řady experimentů. Uvažuje se o možnosti vzdáleného přístupu k PAC přes síť Internet a provádění časově náročných experimentů vzdáleně.

Ve spolupráci s TU Košice se pokračuje ve snaze o experimentálně-analytickou identifikaci spalovacího procesu. Naděje jsou vkládány i do vytvoření modelu na bázi fuzzy neuronových sítí, který sice neumožní vysvětlit podstatu procesů, které při spalování probíhají, avšak umožnil by provést simulaci experimentu ještě před jeho skutečným provedením a podpořil tak přesnější přípravu. Experimenty s bezmodelovým řízením pomocí PID regulátorů v současné době provádí student magisterského stupně z Technické university v Tampere (Finsko) a snaží se najít vhodnou metodu pro nalezení optimálních parametrů PID regulátorů. Změna algoritmu roštování a úprava mechanismu roštovacího hřebene se osvědčila a stala se trvalou součástí provozu kotle.

Chladicí okruh je v částečném provozu a běžně slouží ke chlazení vody ohřáté při experimentech s velkým 400 kW kotlem. Odplynovač však ještě není úplně dokončen a tak zatím není možné ověřit shodu simulačního modelu s reálným chováním procesu.

Poděkování

Projekt je řešen jako část výzkumného záměru MSM6840770035 Rozvoj ekologicky šetrné decentralizované energetiky.

Literatura

- [1] Loo S., Jaap K., *The handbook of biomass combustion and co-firing*. Earthscan: 2008.
- [2] Wiinikka, H., Gebart, R., Critical parameters for particle emissions in small-scale fixed-bed combustion of wood pellets. *Energy & Fuels*. 2004, vol 18/4, s. 897-907.
- [3] Hrdlička, J., Hrdlička, F., Verner, R., Possible Use of Energetic Plants in Small Scale Combustion, in: Nordic Bioenergy Conference 2005, Trondheim, 2005.
- [4] Klimánek, D., *Detection of a Biased Control Loop Function via Evolutionary Algorithms*. PhD. Thesis. CTU in Prague, 2007.
- [5] Malaťák, J., Vaculík, P. *Biomasa pro výrobu energie*. Česká zemědělská universita v Praze: 2008.
- [6] Lepold, M., Plaček, V., Vrána, S., Šulc, B., Neural Model of Biomass Fired Boiler Emission Changes Caused by Grate Motion, in: sborník konference ARTEP 2009, Košice, 2009, s. 83/1-83/8.
- [7] ČVUT v Praze. Zařízení pro odvádění tepla z chlazeného média v energetických zařízeních. Původce vynálezu: J. Maščuch, J. Hrdlička. MPT F 28 C 1/100. Česká republika. Užitečný vzor 20194. 3. 11. 2009