



Mokrý vypírka pro čištění energoplynu

Marek BALÁŠ^{1,*}, Martin LISÝ¹, Jiří KUBÍČEK¹

¹ Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Odbor energetického inženýrství,
Technická 2896/2, 616 69 Brno, Česká republika

* Email: balas.m@fme.vutbr.cz

Decentralizovaná výroba elektrické energie a kogenerace jsou v současné době hlavním řešením otázek zvyšování účinnosti a energetické bezpečnosti. Zplyňováním biomasy získáváme plyn, který se v kogeneračních jednotkách dá využít. Takto generovaný plyn generovaný ale obsahuje celou řadu nečistot, které je třeba vyčistit, a to především od prachu a dehtu. Mokrý vypírka je jednou z možných cest čištění plynu. Článek pojednává o nečistotách v energoplynu a porovnává dvě možné kapaliny, které se dají pro čištění plynu využít.

Klíčová slova: biomasa, zplyňování, čištění plynu, mokrý vypírka

1 Úvod

Zplyňování je již velmi stará technologie – záznamy o jejím účelném využívání pocházejí z první poloviny 19. století. K jejímu masovému využití došlo především v období druhé světové války, a to v podobě automobilů na dřevoplyn. Později, na přelomu sedmdesátých a osmdesátých let 20. století a počátkem devadesátých let, se zájem o její potenciál obnovil. V současné době je výzkum v oblasti zplyňování motivován potřebou nahradit zdroje fosilní zdroji obnovitelnými, a to jednak proto, že se v blízké budoucnosti očekává zhoršení jejich dostupnosti, jednak z důvodu rostoucího vlivu skleníkového efektu.

Generovaný plyn obsahuje řadu nečistot, které stojí v cestě v jeho přímém použití. Sladění požadavků na jakost plynu s jeho reálnou kvalitou může být dosaženo mnoha způsoby. Zkoumají se tzv. primární opatření, kdy je pozitivně ovlivňován samotný proces zplyňování, i na sekundárních opatřeních, kdy je mezi zplyňovač a spotřebič zařazen blok čištění plynu. Každé z opatření má samozřejmě své výhody i nevýhody, avšak pokud nejsou jejich principy, okrajové ovlivňující podmínky, specifika a omezení dostatečně popsány, nelze je přímo porovnávat.

Článek se zabývá mokrým čištěním plynu pro dosažení požadavků na koncentraci nečistot pro spalovací motor. Jako výchozí je brán znečištěný plyn vystupující o vysoké teplotě (500–800 °C) z atmosférického fluidního zplyňovače. Pozornost je zaměřena především na vypírání dehtu, explicitně jde však i o odstraňování prachu.

Jádrem práce je vypírání dehtu, jakožto směsi vyšších uhlovodíků a jejich sloučenin. Pro vypírku dehtu z plynu lze použít jednak vodu, jednak organickou kapalinu. V případě organické kapaliny budou pro výběr konkrétní látky hlavními kritérii teplota varu (těkavost), její dostupnost a cena. V minulosti, kdy probíhal rozsáhlý výzkum v oblasti zplyňování uhlí a výroby svítiplynu, se používal prací olej. V současnosti se ve světě alternativně používá



bionafta, resp. metylester řepkového oleje (RME). Hodnoceny byly obě kapaliny, ale vzhledem k tomu, že RME pochází z obnovitelných zdrojů a zdá se být ekologicky přijatelnějším, je mu v práci věnován větší prostor.

Vypírání plynu generovaného zplyňováním biomasy (nebo jiného organického materiálu) má svá specifika. Plyn obsahuje velmi jemný málo smáčivý prach (popel, nedopal, saze), dehet (směs vyšších uhlovodíků a jejich sloučenin) a vodní páru. Dehet kondenzuje v širokém teplotním rozmezí od cca 180 až 300 °C až do záporných teplot. Při své kondenzaci vytváří na chladných površích lepivý tekutý povlak, který je při kontaktu s prachem příčinou velmi obtížně odstranitelných usazenin. Na druhou stranu se při poklesu pod rosný bod vytváří jemná dehtová mlha, kterou nelze běžnými odlučovači z plynu odstranit. Teplota kondenzace a obsah dehtu v plynu jsou svázány fázovou rovnováhou.

Při vypírce se u obou druhů kapalin (voda, organická kapalina) v důsledku rozdílné rozpustnosti dehtu uplatňují rozdílné mechanismy. U vody je to především kondenzace a následné zachycování vzniklých kapek aerosolu, u organické kapaliny se uplatňuje více absorpce a difúze. Obojí je v práci teoreticky rozebráno. Výstupem je porovnání koncentrací dehtu, před a po vypírce plynu při různých teplotách prací kapaliny. Přitom teplotní intervaly, v kterých byly experimenty prováděny, se u obou kapalin překrývají jen z malé části (voda 0–40 °C, RME 30–85 °C). Rozsah teplot byl volen s ohledem na praktické použití obou druhů kapalin. V případě organické vypírky se počítá s tím, že proces bude probíhat nad rosným bodem vody, aby bylo minimalizováno množství odpadní vody zatížené PAH a jejich deriváty.

Kromě studie účinnosti vypírky byl proveden rámcový rozbor ostatních vlastností pracích kapalin a aspektů, které mohou být při hodnocení celé technologie důležité. Jedná se o některé transportní a termodynamické vlastnosti (tepelná kapacita, viskozita, tense par), možnosti likvidace a regenerace odpadní kapaliny, rizika při nakládání s kapalinou, její dostupnost a cenu.

2 Nečistoty v plynu

Možnosti využití plynu generovaného při zplyňování biomasy pro následnou výrobu elektrické energie brání především problémy související s čištěním tohoto produktu. Obsah nečistot v plynu způsobuje provozní problémy jednotek. Koroze, ucpávání přívodních cest a zadehtování pracovních ploch motorů a turbín může vést až k vážným poruchám provozovaného zařízení. Tyto nečistoty nejčastěji rozdělujeme na:

- prach (tuhý úlet)
- alkalické sloučeniny
- sloučeniny obsahující dusík
- dehet
- lehké uhlovodíky (metan, etan)
- těžké uhlovodíky

Pro některá zařízení může představovat potenciální problémy také chlor, fluor a křemík. Křemík je sledován zejména u spalovacích motorů, kde negativně působí na kvalitu mazacího oleje.



2.1 Tuhý úlet

Pevné částice obsažené v surovém plynu vystupujícím ze zplyňovače jsou tvořeny anorganickými zbytky paliva (popelovinami), nezreagovanou biomasou ve formě zuhelnatělého materiálu (tzv. polokoksu), případně inertním materiálem lože zplyňovače. Určitý podíl prachu tvoří také saze. Plyn s vysokým obsahem částic je typický pro fluidní zplyňovače s bublajícím a cirkulujícím ložem, a to díky turbulentním podmínkám uvnitř reaktoru. Při termickém zpracování biomasy se mohou tvořit také aerosoly, které mají negativní vliv na skleníkový efekt a na lidské zdraví.

Spolu s dehtem vytváří částice nánosy uvnitř potrubí a způsobují abrazi a zanášení použitých zařízení na úpravu a využití plynu.

K odstraňování částic jsou používány (popř. testovány) cyklónové odlučovače, bariérové filtry, elektrostatické odlučovače a mokré pračky.

2.2 Alkalické sloučeniny

Obsah popela je v případě biomasy nízký. Některé jeho složky však mohou být příčinou řady provozních problémů. Jsou to především alkalické kovy, jmenovitě draslík (K) a sodík (Na). Vyskytují se zvláště ve stébelninách. Soli těchto dvou látek se vypařují do 700 °C, jsou dobře tavitelné a na chladnějších plochách zařízení (pod 650 °C) tvoří depozice sklovitého popelového materiálu. Tyto nánosy se týkají především výměníků tepla, spalovacích motorů a plynových turbín zařazených za generátorem, protože pokud alkalické sloučeniny nejsou z plynu odstraněny, prochází celým systémem a problém kondenzace a usazenin se objevuje až za použitým filtračním zařízením. Dalším problémem je vysokoteplotní koroze použitých kovových konstrukčních materiálů, která může být zapříčiněna alkalickými solemi, zvláště, je-li přítomen vanad jako katalyzátor korozní reakce (spoluzplyňování biomasy a odpadu).

Problém usazování alkalických solí je obvykle řešen ochlazením plynu a odloučením jemných částic, na nichž soli při teplotách pod 600 °C kondenzují, s využitím vysoce účinných metod, jako např. elektrostatických a rukávových filtrů nebo mokrých praček.

2.3 Sloučeniny obsahující dusík

Převážná část dusíku se ve vyrobeném plynu vyskytuje ve formě N_2 a jeho množství závisí především na druhu zplyňovacího média. Mimo to se dusík vyskytuje ve formě sloučenin, kde hlavní sloučeninou obsahující dusík v surovém plynu ze zplyňování biomasy je čpavek (NH_3). NH_3 vzniká konverzí z proteinu a dalších složek biomasy obsahujících dusík. Paliva obsahující vysoký podíl proteinů (jako např. živočišné odpady) jsou proto zdrojem velmi vysoké produkce čpavku. Sloučeninou sekundárního významu je např. Kyanid (HCN).

Odstranění sloučenin dusíku lze realizovat použitím standardních katalytických metod pro redukci NO_x , nebo lépe ještě před spalováním za použití katalyzátoru pro rozklad NH_3 či, v případě akceptovatelných nízkých teplot plynu, mokrou vypírkou. V pračkách však díky své rozpustnosti ve vodě může způsobovat provozní potíže, protože jejich odstraňování z vody je velice obtížné, voda se složkami HCN a NH_3 nasytí a není schopna je dále jímát.



2.4 Síra

Vzhledem k redukčnímu prostředí ve zplyňovacím reaktoru je síra v surovém plynu zastoupena zejména sirovodíkem H_2S (93–96 %), méně pak sirouhlíkem CS_2 , zatímco sloučeniny COS a SO_x jsou v minimálním množství. Tyto sloučeniny vznikají ze síry obsažené v palivu. Obecně se však v biomase nachází ve velmi nízkém množství (řádově setiny až desetiny procenta hmotnosti), takže koncentrace H_2S jsou povětšinou pod hranicí měřitelnosti. Přesto je její odstranění z plynu pro většinu aplikací žádoucí, protože může způsobovat řadu provozních komplikací. Spolu s chlorem, fluorem a alkalickými solemi působí síra korozívně na ocelové konstrukční materiály. Síra je také potenciálním nebezpečím pro některé druhy katalyzátorů i ve velmi malém množství (jednotky ppm). Např. technologie produkce metanolu ze syntézního plynu používá katalyzátory, které mohou být deaktivovány (otráveny) sírou. Také některé katalyzátory pro redukci dehtů jsou citlivé na obsah síry. V těchto případech je důležité dokonalé odstranění veškeré síry z plynu.

Pro odstranění síry jsou dostupná v praxi dobře odzkoušená zařízení mokré vypírky s aditivy (velmi nákladné), reakcí s vhodným sorbentem nebo adsorpcí na kovových katalyzátorech.

2.5 Chlor

Chlor je v biopalivu obsažen v poměrně nízkých koncentracích. Přesto může být příčinou tvorby HCl a perzistentních organických látek (PCDD, PCDF), které vznikají reakcemi uhlíku a chloru, podporované oxidy mědi jako katalyzátorem. V plynu se chlor vyskytuje nejčastěji ve formě HCl .

Některé sloučeniny chloru, zejména HCl , je možno odstranit mokrou vypírkou.

2.6 Dehet

Dehet vzniká jako vedlejší produkt pyrolýzních reakcí, kdy hlavním zdrojem je prchavá hořlavina. Definice dehtu (či dehtů) jsou různé a po dlouhý čas neexistoval na dehet, jeho složení a analýzu ve vědeckém světě jednotný názor. Zvrat přišel až po iniciativě pracoviště ECN (Energy research Centre of the Netherlands), které se problematikou dlouhodobě zabývalo a vydalo o dehtu, jeho složkách, vlastnostech, jímání a analýze publikaci, tzv. „Tar protocol“, jehož definice a metody jsou v Evropě i ve světě uznávány.[1] Dehem je tedy označena skupina látek s nejrůznější strukturou a chemickou povahou, definovaných jako suma organických látek s bodem varu vyšším než benzen ($80,1\text{ }^\circ\text{C}$).[2]

Obsah dehtu v plynu ze zplyňování biomasy kolísá od 1 do 15 g.m_n^{-3} (extrémně až do 75 g.m_n^{-3}) v závislosti na typu zplyňovače, teplotě v loži při zplyňování, teplotě a době setrvání plynu ve freeboardu a charakteristice paliva (granulometrii, vlhkosti, atp.).[3][4][5]

V plynu se dehet vyskytuje ve formě par nebo jako perzistentní aerosol. Typicky kondenzuje při nižších teplotách. Při své kondenzaci na chladných površích vytváří dehet nánosy a spolu s pevnými částicemi ucpávají potrubí a použitá zařízení. Počátek kondenzace dehtu souvisí jak s jeho koncentrací v plynu, tak s jeho složením. Při teplotách pod $400\text{ }^\circ\text{C}$ mohou složky dehtu projít dehydratačními reakcemi do tvorby zuhelnatělého materiálu a koksu. Ne všechny složky dehtu jsou nežádoucí – některé sloučeniny mohou kladně ovlivnit výhřevnost plynu bez následných provozních problémů. Přesto bývá přítomnost dehtu v plynu



označována za „Achillovu patu“ termického zplyňování biomasy. Z toho vyplývá nutnost jeho odstranění (či alespoň redukce) před dalším využitím plynu.

3 SNIŽOVÁNÍ OBSAHU DEHTU V PLYNU

Opatření ke snížení obsahu dehtu v plynu lze rozdělit na primární a sekundární. Sekundární pak na suché a mokré.

3.1 Primární opatření

Jedná se o opatření aplikovaná uvnitř reaktoru. Jsou velmi žádoucí, protože mají potenciál zvýšit celkovou účinnost přeměny energie a současně omezují potřebu odstraňovat dehet z plynu mimo reaktor a nutnost jeho následné likvidace. Obecně jsou používány dva postupy:

- termický rozklad - bez přítomnosti katalyzátoru lze dehet úspěšně termicky štěpit při teplotách nad cca 1200 °C. Minimální teplota pro požadovanou účinnost destrukce není charakterizována a bude záviset na typu dehtu vznikajícího v reaktoru. Např. pro protiproudé sesuvné zplyňovače, kde se typicky tvoří primární dehty, může být dostatečná již teplota okolo 900 °C. Zvýšení teploty je obvykle dosaženo částečným spálením vyrobeného plynu, s čímž je ovšem často spojen pokles výhřevnosti až o 25–30 %, nebo plasmou, což je ovšem vhodnější pro likvidaci odpadu, kde je elektřina potřebná pro tvorbu plasmy vedlejším produktem. Oba zmíněné postupy výrazně oslabují ekonomickou stránku zplyňování, a proto v případě zplyňování biomasy není pravděpodobně termický rozklad vhodnou a perspektivní metodou k redukci obsahu dehtu v plynu.
- katalytický rozklad – pro katalytickou podporu štěpné reakce jsou do lože reaktoru přidávány různé materiály jako olivín, křemenný písek a jiné minerální a kovové látky. Jako nejhodnější se pro svou dostupnost, cenu a vlastnosti jeví dolomit. Ve fluidním loži probíhají reakce velmi intenzivně díky poměrně vysokým teplotám a turbulentnímu proudění, avšak dochází k otěru a deaktivaci katalyzátoru. Na druhou stranu v pevném loži bývá nedostatečný kontakt mezi katalyzátorem a dehty, a proto často není jejich destrukce kompletní.

3.2 Sekundární opatření

Sekundární opatření pro snížení obsahu dehtu pracují mimo reaktor:

- **bariérové filtry** – použitelné jsou filtry tvořené pevnou vrstvou sypaného materiálu, např. pilin, dřevní štěpky, korku, nebo písku. Filtry odstraňují především prach, dehet pouze v menší míře. Dále je nutno zajistit kontinuální obměnu filtračního materiálu, aby nedošlo k vysoké tlakové ztrátě vlivem filtračního koláče. Také je problém s použitým materiálem, který je třeba regenerovat, spálit nebo jinak zlikvidovat.
- **katalyzátory** - běžně jsou používány ke štěpení dehtů dolomity, zeolity, kalcity a křemičitany a na druhou stranu různé kovové katalyzátory na bázi Ni, Mo, Co, Pt, Ru a dalších prvků. Převážná většina kovových katalyzátorů je však citlivá na deaktivaci sírou, a proto je jejich životnost nízká. S dolomitem byla v laboratorních podmínkách dosažena konverze dehtu 95 až 99 % při teplotách 750 až 900 °C. Z toho plyne nevýhoda, a sice nutnost opětovného ohřátí plynu z teploty na výstupu reaktoru (povětšinou pod 800 °C)



nad teplotu 900 °C. Je také nutno vytvořit rovnoměrné teplotní pole k zaručení průběhu reakce v celém průřezu. Ohřívát katalyzátor lze interně spalováním části plynu (úbytek výhřevnosti bude nižší než při termickém štěpení), nebo externě přívodem tepla z jiného zdroje. V obou případech je ohřev na úkor účinnosti celého zařízení. Navíc může být dolomit deaktivován z důvodu formování uhličitánů na jeho povrchu a je také citlivý na otěr (turbulence v loži – předpokládá se mírně bublající fluidní vrstva).

- **mokrý pračky plynu** - většina praček zachycuje dehet prostřednictvím srážek kapiček odlučované hmoty s prací kapalinou. Předpokladem pro vytvoření kapiček dehtu je předchozí ochlazení plynu na teplotu pod 100 °C (obvykle z teploty filtrace kolem cca 250 °C, při níž jsou z plynu odstraněny pevné částice). Běžně je požadována výstupní teplota plynu v rozsahu 35–60 °C. Pračka tedy musí plnit funkci chladiče a odlučovače jemné dehtové mlhy, někdy také odlučovače pevných částic. Vysoký obsah pevných částic v plynu však může negativně ovlivňovat účinnost odloučení dehtu. Pro odstranění dehtu v pračce lze využít mimo kondenzaci a srážení částic dalších fyzikálních jevů jako je difuze, rozpustnost a absorpce, a proto je vhodné, jak je diskutováno níže, zaměřit pozornost na vlastnosti prací kapaliny, které by zajistily vedle klasického principu sběru částic přídatný čistící efekt. Nevýhodou systémů s pračkou plynu je snížení celkové účinnosti zařízení (lze omezit použitím organické kapaliny). Vysokokapacitní citelné teplo plynu přechází do prací kapaliny, ale díky její nízké výstupní teplotě nemůže být využito. Pokud není použita jiná prací kapalina, je další nevýhodou produkce znečištěné vody, kterou je nutno před vypuštěním do kanalizace předčistit.

4 Porovnání pracích kapalin

Koncepce odlučování dehtu z plynu na bázi mokré vypírky se u vody a RME liší. Ačkoli je možné odstraňovat prach z plynu v rámci vypírky, u obou variant se vzhledem k možným provozním obtížím předpokládá, že bude z plynu separován ještě před vstupem do pračky.

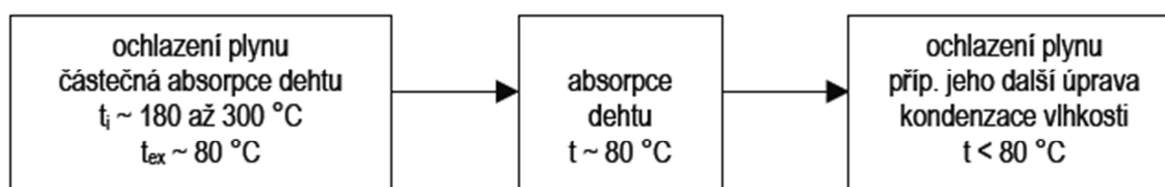
4.1 Vypírka na bázi organické kapaliny

Řada organických kapalin vykazuje vysokou rozpustnost sloučenin obsažených v dehtu. Někdy jsou obě látky vzájemně mísitelné. Odlučování dehtu pomocí vypírky organickou kapalinou bude tedy probíhat na bázi absorpce, jejíž hnací silou je rozdíl reálné a rovnovážné koncentrace. Vzhledem k tomu, že uspokojivých výsledků lze při volbě vhodné kapaliny dosáhnout i při vyšších teplotách (např. 70 až 90 °C), a s ohledem na požadavek jednoduché regenerace prací kapaliny je vhodné provádět vypírku za teplot vyšších než je rosný bod vody obsažené v plynu. Celý proces odstraňování dehtu z plynu pomocí organické kapaliny lze tak rozdělit do několika stupňů:

- chlazení plynu přímým kontaktem s kapalinou – vstupní teplota plynu by měla být vyšší, než je teplota počátku kondenzace dehtu, aby se zabránilo tvorbě usazenin v předřazených zařízeních a spojovacím potrubí; předpokládá se, že během ochlazování bude část dehtu absorbována prací kapalinou; stejně jako u vody může v důsledku prudkého poklesu teploty dojít k přesycení par dehtu a k formování aerosolu, avšak neočekává se, že by tento jev probíhal ve větším měřítku; výstupní teplota plynu by neměla být nižší, než je teplota rosného bodu vody, aby nedocházelo k znehodnocení prací kapaliny



- absorpce dehtu a odlučování dehtové mlhy – při kontaktu s kapalinou za relativně ustálené teploty (v druhém stupni může být plyn ještě mírně ochlazen) bude docházet k přenosu hmoty na bázi difuze, jejíž hybnou silou je rozdíl koncentrací; při odlučování aerosolu bude také dominovat tok hmoty nad mechanickými ději; vhodným zařízením pro druhý stupeň je pračka určená k přenosu hmoty; za ní by měl být zařazen účinný separátor kapek, aby z pračky neodcházela prací kapalina, ani koagulované kapky aerosolu
- ochlazení a další úprava plynu – z pračky vystupuje plyn, který má příliš vysokou teplotu na to, aby mohl být zaveden přímo do motoru – musí být proto ochlazen; v důsledku absorpce dehtu prací kapalinou není plyn jeho parami nasycen a je možno jej ochladit bez nebezpečí vzniku kondenzátu – samozřejmě jen na určitou teplotu; alternativně lze za vypírku zařadit další stupeň čištění, např. pro odstranění sirovodíku, chlorovodíku nebo sloučenin dusíku.



Obr. 1 Schéma absorpce dehtu vypírkou na bázi org. kapaliny

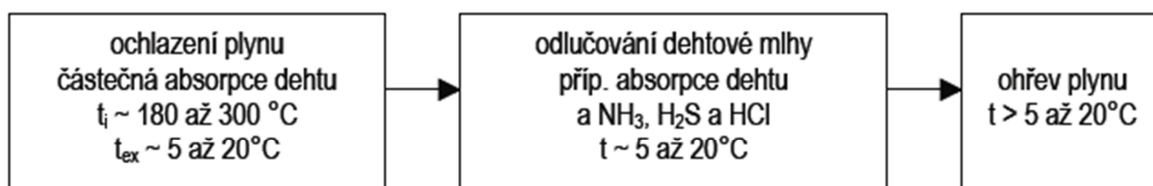
4.2 Vypírka na bázi vody

Voda je schopna absorbovat PAH pouze v omezené míře. Brzy se nasytí a dehet pak začne vytvářet samostatnou kapalnou fázi – vzniká aerosol se submikronovými rozměry (dehtová mlha). Pro dosažení požadované čistoty plynu je nutná separace této disperze. Odlučování dehtu ve vodní pračce by mělo proto sestávat z následujících kroků:

- chlazení plynu přímým kontaktem s kapalinou – vstupní teplota plynu by měla být vyšší, než je teplota počátku kondenzace dehtu, aby se zabránilo tvorbě usazenin v předřazených zařízeních a spojovacím potrubí; během ochlazování může být minoritní část dehtu absorbována vodou; v důsledku prudkého poklesu teploty dojde k přesycení par dehtu a k formování aerosolu; při nižších teplotách bude kondenzovat také voda
- odlučování dehtové mlhy – očekávatelná disperzita dehtové mlhy je podle literárních podkladů 0,1 až 2 μm ; kapičky dehtu lze separovat pomocí některých typů praček nebo jiných odlučovačů – viz dále; jejich nasazení je limitováno odlučivostí mikronových a submikronových částic
- ohřev plynu – vzhledem k tomu, že plyn vystupuje ze zařízení prakticky nasycen dehty, doporučuje se kvůli prevenci další kondenzace mírně zvýšit jeho teplotu; konečná výstupní teplota ovšem musí být nižší než maximální dovolená teplota plynu na vstupu do motoru
- Plyn lze chladit na nízké teploty i za pomoci organické kapaliny, např. pracího oleje. Lze tak dosáhnout mnohem nižších výstupních koncentrací dehtu. Nevýhodou tohoto řešení je mísení kondenzující vody a organických látek. Použitou kapalinu je pak obtížné regenerovat. Při chlazení vodou může být absorbován z plynu i NH_3 , H_2S a HCl . Absorpce je ovšem omezena nasycením vody, takže úspěšnost cíleného odlučování těchto plynů je podmíněna regenerací prací kapaliny.



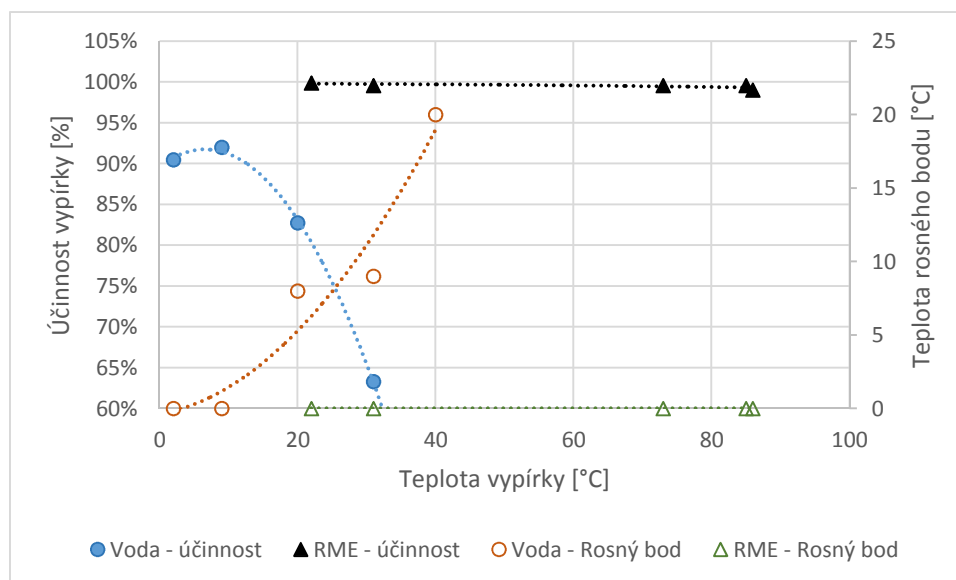
Prakticky za každou pračkou by měl být instalován účinný separátor kapek, aby nebyl výsledný efekt zmařen strháváním kapek prací kapaliny a aerosolu.



Obr. 2 Schéma absorpce dehtu vypírkou na bázi vody

5 Výsledky a diskuze

Pro posouzení teoretických požadavků byla provedena celá řada experimentů. Výsledky jsou shrnuty do níže uvedeného grafu.



Obr. 3 Závislost účinnosti vypírky na teplotě prací kapaliny

- Z grafu je patrná silná závislost účinnosti pračky na teplotě prací vody a tím pádem i na teplotě rosného bodu dehtu po vypírce. Při použití RME, jako prací kapaliny tato závislost ve sledovaném rozsahu není patrná. Je to zejména proto, že účinnost absorpce dehtu touto prací kapalinou je velice vysoká a ve sledovaném rozsahu nelze vysledovat žádnou závislost.
- Práce se zabývala odstraněním dehtu z plynu generovaného při zpyňování biomasy. Negativní působení dehtu spočívá především v tvorbě hustého kondenzátu. Výrobci motorů neudávají limitní koncentrace dehtu, nýbrž požadují, aby se nikde v sání netvořil kondenzát. Během ochlazování plynu z výstupní teploty ze zplyňovače (okolo 700 °C) na vstupní teplotu do motoru (10–60 °C) se mohou vyskytnout problémy s korozí (H₂S, HCl, NH₄Cl) a s tvorbou nánosů (alkalické sloučeniny, dehty + prach, NH₄Cl). Aby se zabránilo tvorbě lepivých nánosů – směsi kondenzujícího dehtu a prachu – je vhodné



nejprve při vyšších teplotách odstranit prach (cca při 180 až 300 °C podle obsahu a složení dehtu) a poté plyn ihned zavést do pračky.

- Při prudkém ochlazení plynu dochází k tvorbě velmi jemného perzistentního aerosolu – dehtové mlhy. Rozměry kapiček aerosolu se pohybují typicky v rozsahu 0,1 až 2 μm . Chladne-li plyn nasycený parou pomalu, vznikne malý počet zárodků, které při dalším pozvolném ochlazení, rostou ve větší kapky. Pokud je ochlazen náhle, utvoří se mnoho zárodků a z nich mnoho malých kapek. V případě, že jsou rozptýlené kapičky velmi malé, je mlha stálá. Účinné odstranění aerosolu nebo zamezení jeho tvorby je jedním z klíčových úkolů při vypírce plynu.
- Do spalovacího motoru musí být přiváděn plyn prostý dehtové mlhy o teplotě, která bude s dostatečnou rezervou převyšovat rosný bod dehtu. Přitom je třeba zohlednit teplotu chladných stěn a podtlaky v sání.
- Mezi vypírkou pomocí vody a organické kapaliny je řada diametrálních rozdílů:

5.1 VODA

- Rozpustnost většiny složek dehtu ve vodě je nízká (výjimku tvoří heterocyklické sloučeniny). Absorpcí do čisté vody lze odstranit především heterocyklické sloučeniny a nejvyšší PAH. Polycyklické uhlovodíky se dvěma až třemi kruhy zůstávají v plynu v koncentracích umožňujících další kondenzaci. Tvořící se samostatná kapalná fáze je buď stržena vodou, nebo odchází s plynem ve formě již zmíněného aerosolu. V reálném zařízení se předpokládá, že přiváděná voda bude částečně nasycena dehty. Vypírka dehtu je tedy založena především na odstraňování vzniklého aerosolu.
- Nevýhodou vypírání plynu vodou je převod části využitelného tepla plynu na nízkopotenciální, produkce ekologicky nežádoucí odpadní vody a nutnost mít k dispozici zdroj chladné vody nebo zařízení k její přípravě. V letních měsících to znamená nasazení sprchové věže, zkrápěného chladiče anebo chilleru. Poslední varianta je značně nákladná.
- Výhodou vodní vypírky je relativně nízká cena prací kapaliny.

5.2 ORGANICKÁ KAPALINA

Většina složek dehtu je v organické kapalině plně rozpustná. Schopnost organických kapalin jímat dehet je proto vysoká a rovnovážné koncentrace odpovídající zvolené teplotě jsou mnohem nižší než rovnovážné koncentrace při kondenzaci samotného dehtu. Odstraňování dehtu pomocí organické kapaliny je založeno především na difuzi, a proto je nutno použít účinný výměník hmoty. Stejně jako u vodní vypírky musí být plyn ochlazen. Jeho výstupní teplota by ovšem neměla poklesnout pod 75 až 80°C (dle vlhkosti plynu), aby prací kapalina nebyla znehodnocena kondenzující vodou a aby nebyly kondenzací vody narušeny tepelné a hmotnostní toky v pračce.

Výhodou organické vypírky je vysoká účinnost a schopnost snížit rosný bod dehtu hluboko pod teplotu vypírky. Dalšími pozitivními skutečnostmi jsou: prakticky bezodpadové hospodářství a možnost využít teplo plynu při chlazení prací kapaliny. Nevýhodou vypírání plynu organickou kapalinou je především vysoká cena prací kapaliny, kterou je nutno kvůli odpařování neustále doplňovat.

Druh organické kapaliny by měl být vybírán s ohledem na cenu, příslušnost do skupin podle Ewellovy klasifikace a na tense par. Vzhledem k potřebě minimalizovat její ztráty by měly být tense prací kapaliny při pracovní teplotě co nejnižší.



Z ekonomických důvodů je žádoucí, aby byl obsah dehtu, příp. dalších příměsí v plynu minimalizován již v rámci primárních opatření na co možná nejnižší míru (v rámci optimalizace). Sníží se tak především spotřeba prací kapaliny a nároky na účinnost pračky plynu.

Organický prach dispergovaný v generovaném plynu je obtížně smáčivý vodou a obsahuje značný podíl mikronových a submikronových částic. Jeho odstraňování při vodní vypírce je tudíž značně náročné. Alternativou je použití přímého vodního chladiče a elektroodlučovače. Odstraňování prachu pomocí organické kapaliny je z fyzikálního hlediska poměrně snadné a je tudíž možné tento proces sloučit s vypírkou dehtu. Přitom je potřeba dbát na prevenci tvorby lepidivých nánosů v pračce a vyřešit regeneraci kapaliny. Jednodušším řešením odprášení se zdá být v obou případech použití textilního filtru.

Poděkování

Článek vznikl za podpory Specifického výzkumu na FSI VUT v Brně, projekt FSI-S-14-2403

Použitá literatura

- [1] Simell, P. at al Provisional protocol for the sampling and analysis of tar and particulates in the gas from large-scale biomass gasifiers. Version 1998, Biomass and Bioenergy, Volume 18, Issue 1, January 2000, Pages 19-38, ISSN 0961-9534, DOI: 10.1016/S0961-9534(99)00064-1.
- [2] Neft, J. P. A. at al *Guideline for Sampling and Analysis of Tar and Particles in Biomass Producer Gases*. Energy project ERK6-Ct199-2002 www.tarweb.net
- [3] Kurkela, E., Ståhlberg, P. *Air Gasification of Peat Fluidized-bed Reactor. I. Carbon Conversion, gas yields and tar formation*. Fuel Processing Technology 31, 1992, 1-21
- [4] Coll, R., Salvado, J., Farriol, X., Montané, D. *Steam Reforming Model Compounds of Biomass Gasification Tars: Conversion at Different Operating Conditions and Tendency towards Coke Formation*. Fuel Processing Technology 74, 19÷31, 2001, Elsevier
- [5] Kurkela, E., Ståhlberg, P., Laatikainen, J., Simell, P. *Development of Simplified IGCC-Processes for Biofuels: Supporting Gasification Research at VTT*. Bioresource Technology 46 (1993) No.1-2, p. 34