



národní
úložiště
šedé
literatury

Vícestupňové zplyňování biomasy

Skoblia, S.
2015

Dostupný z <http://www.nusl.cz/ntk/nusl-201029>

Dílo je chráněno podle autorského zákona č. 121/2000 Sb.

Tento dokument byl stažen z Národního úložiště šedé literatury (NUŠL).

Datum stažení: 27.07.2024

Další dokumenty můžete najít prostřednictvím vyhledávacího rozhraní [nusl.cz](http://www.nusl.cz) .

Vícestupňové zplyňování biomasy.

Siarhei SKOBLIA^{1,*}, *Zdeněk BEŇO*¹, *Jiří BRYNDA*¹, *Michael POHOŘELÝ*^{2,3}, *Ivo PICEK*⁴

¹ Ústav plynárenství, koksochemie a ochrany ovzduší, VŠCHT Praha, Technická 5, Praha 166 28 Praha 6

² Ústav chemických procesů AV ČR, v. v. i., Rozvojová 1/135, 165 02 Praha 6–Suchbát

³ Ústav energetiky, VŠCHT Praha, Technická 5, Praha 166 28 Praha 6

⁴ TARPO s.r.o., Pražská 346, Kněžves 270 01

* **Email:** skobljas@vscht.cz

Príspevek je venován stručnému popisu vývoje zařízení pro zplyňování biomasy ve vícestupňových systémech využívajících prostorového rozdělení prolyzních, oxidačních a redukčních zón k produkci plynu s vyšší účinností a nízkým obsahem dehtu.

Klíčová slova: zplyňování biomasy, generátor s pevným ložem, vícestupňový generátor

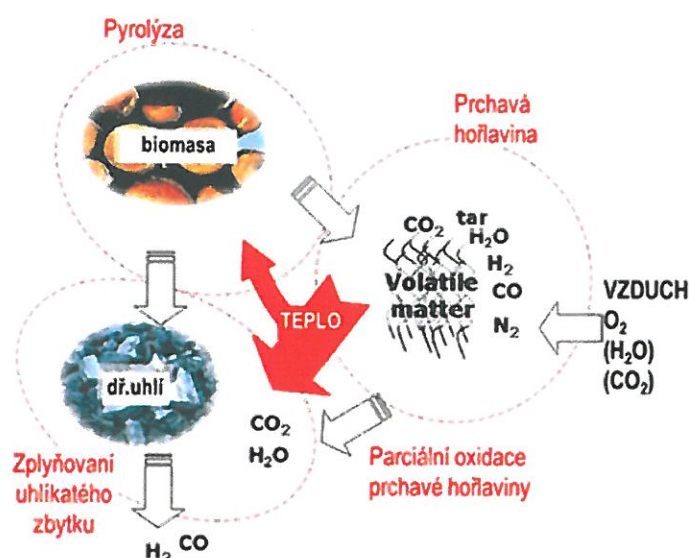
1 Úvod

Kombinovaná výroba elektrické energie a tepla z biomasy v malých a středních kogeneračních jednotkách byla vždy jedním z preferovaných cílů výzkumu a vývoje oboru malé energetiky. Už od začátku 20. století se zplyňovací generátory využívaly pro různá průmyslová odvětví (plynárenství, výroba kovu, tavení skla) a během světových válek a energetických krizí byly i mobilním zdrojem plynného paliva pro dopravní prostředky. Spalovací motory jsou používány pro výrobu mechanické energie z plynných paliv už také více než 100 let a během této doby byly značně zmodernizovány, zvýšila se jejich účinnost, výkonnost a spolehlivost. Lze předpokládat, že díky tomu spalovací motory budou i nadále masově používány pro energetické zužitkování vyráběného plynu. Bohužel současně s vývojem spalovacích motorů stoupaly také jejich požadavky na kvalitu plynných paliv. V důsledku toho je nutné pro úpravu běžného generátorového plynu použít složitější a dražší zařízení, značně zvyšující jak investiční tak i provozní náklady celé kogenerační jednotky. Provoz podobných jednotek také evidentně přináší i zvýšené náklady na likvidaci odpadů vznikajících při provozu čistící linky. Proto je snaha snížit produkci nežádoucích látek v plynu (převážně dehtu) jedním z preferovaných trendů současného vývoje malých a středních kogeneračních jednotek, potřebných pro jejich komerční aplikaci pro kombinovanou výrobu energie a tepla. Uvedený příspěvek se z tohoto důvodu soustřeďuje na způsoby snižování obsahu dehtu v plynu produkovaného zplyňovacími generátory s pevným ložem.

2 Zplyňování biomasy v generátorech s pevným ložem

Zplyňování biomasy je termochemickou přeměnou uhlíkatého materiálu na směs hořlavých plynů působením vysokých teplot a zplyňovacího média. Zplyňování má komplexní povahu a skládá se z více různě rychlých a tepelně zabarvených procesů (Obr. 1). Při teplotách nad 300°C začíná probíhat mírně endotermní pyrolýza biomasy uvolňující prehavou hořlavinu a

produkuje pevný uhlíkatý zbytek. Vzhledem k tomu, že podíl prchavé hořlaviny v biomase dosahuje až 80 %, její chování při zplyňování hraje obzvlášť důležitou roli. Prchavá hořlavina de-facto je hlavním zdrojem dehtu v plynu. Při vyšších teplotách a dostupnosti oxidačního média (O_2) se prchavá hořlavina poměrně snadno oxiduje, vznikají plynné složky CO , CO_2 , H_2O a uvolňuje se reakční teplo. Za nepřítomnosti oxidačního média, nebo po jeho vyčerpání z plynu oxidačními reakcemi, probíhá konverze prchavé hořlaviny ovšem za vzniku směsi primárních, sekundárních a při vyšších teplotách i terciálních složek dehtu a pyrolýzního uhlíku. Při teplotách nad $650^\circ C$ také probíhají endotermní heterogenní reakce uhlíkatého zbytku s CO_2 a H_2O , při teplotách nad $900^\circ C$ jsou dostatečně rychlé a jsou hlavním zdrojem CO a H_2 v plynu. Podíl jednotlivých procesů na finálním složení plynu a obsahu dehtu závisí v první řadě na typu a konstrukci generátoru, podmínkách jeho provozu a způsobu, jakým se jednotlivé procesy, uvedené na Obr. 1, podílejí na tvorbě plynu. Výsledné složení plynu je také ovlivněno výstupní teplotou, použitým zplyňovacím médiem a celkovou tepelnou bilancí procesu zplyňování.



Obr. 1: Zjednodušené schéma procesu zplyňování biomasy [1]

2.1 Použití souprůdného a protiprůdného generátoru pro výrobu plynu

V běžně používaných typech generátorů s pevným ložem nelze produkty uvedených procesů (Obr. 1) dokonale separovat a tak zabránit pronikání nežádoucích složek do plynu. V současné době se pro výrobu plynu z biomasy používají dva základní typy generátorů s pevným ložem (nepočítáme-li kombinovaný křížový), které se odlišují vzájemným směrem toku paliva a plynu. *Protiprůdný generátor* má opačný směr proudění paliva vůči proudění plynu a v důsledku toho je schopný zpracovávat paliva s vysokým obsahem vlhkosti a nízkou kvalitou vstupujícího paliva (vysoký podíl jemných částic, popelovin). De-facto se jedná o jednoduchý, spolehlivý a termicky účinný typ generátoru, jehož jedinou nevýhodou je produkce plynu s vysokým obsahem dehtu ($>100g/m^3$) pocházejícím z prchavé hořlaviny uvolněné v pyrolýzní oblasti generátoru.

Odlišná situace s prchavou hořlavinou nastává v *souprůdném reaktoru*, ve které dodatečně prochází vysokoteplotním pásmem, kde je konvertována na plynné složky. V dolní části *souprůdného generátoru typu "Imbert"* je zabudováno zúžené hrdlo, do kterého se přivádí oxidační médium, zajišťující vysokou teplotu a konverzi prchavé hořlaviny. Účinnost

konverze nebývá absolutní a tak často dochází k pronikání částí pyrolýzních produktů do produkovaného plynu. Kvůli specifické konstrukci hrdla a způsobu distribuce oxidačního vzduchu je zvětšování generátorů typu „Imbert“ problematické, zejména kvůli narušení homogenity toku plynu a vzniku studených zón nad roštem. Hrdlo je také hlavním důvodem klenbování v pyrolýzní a sušicí části generátoru a také je zdrojem dalších problémů, zhoršujících kvalitu produkovaného plynu. *Souproudý generátor vrstevnatého typu* (stratified) vyvinutý v 80. letech minulého století má formu cylindrické nádoby otevřené v horní části a v dolní části uzavřené roštem. Zplyňovací médium a palivo se přivádí na jedné straně reaktoru. Těsně pod sušicí zónou probíhá pyrolýza (odplyňování) a část uvolněné prchavé hořlaviny se zde vznítí a reaguje s oxidačním médiem a teplota v této oblasti stoupá nad hodnotu 1000°C. U *vrstevnatého souproudého generátoru* nelze přesně rozlišit hranici pyrolýzních a oxidačních procesů a proto se jedná o tzv. pyrolýzně-oxidační (flame pyrolysis) zónu. Zde se uvolněná prchavá hořlavina štěpí a celkové množství dehtu výrazně klesá. Vrstevnatý generátor je oproti generátoru „Imbert“ méně náchylný ke klenbování a je schopný zplyňovat palivo s menší velikostí částic (rýžové slupky). Bohužel oba uvedené typy souproudých reaktorů mají vysoké nároky na tvar a vlhkost vstupujícího paliva. Zhoršení homogenity teplotního profilu, tvorba zkratových studených proudů uvnitř oxidační oblasti a špatné míchání oxidačního média (vzduchu) s prchavou hořlavinou jsou hlavními důvody zvýšení obsahu dehtu v plynu. K tomu dochází jak při použití „nevhodného“ nebo vlhkého paliva, tak i při zvyšování velikosti a výkonu souproudých generátorů. Proto použití obou typů souproudých generátorů pro výrobu plynu s nízkým obsahem dehtu je omezeno na menší zařízení (do 100 kW výkonu generátoru) a použití paliva vhodného typu, velikosti a vlhkosti. Při nedodržení jednoho z uvedených požadavků se poměrně rychle z dobře pracujícího souproudého generátoru stává zařízení produkující plyn s vysokým obsahem dehtu.

2.2 Způsoby snižování obsahu dehtu

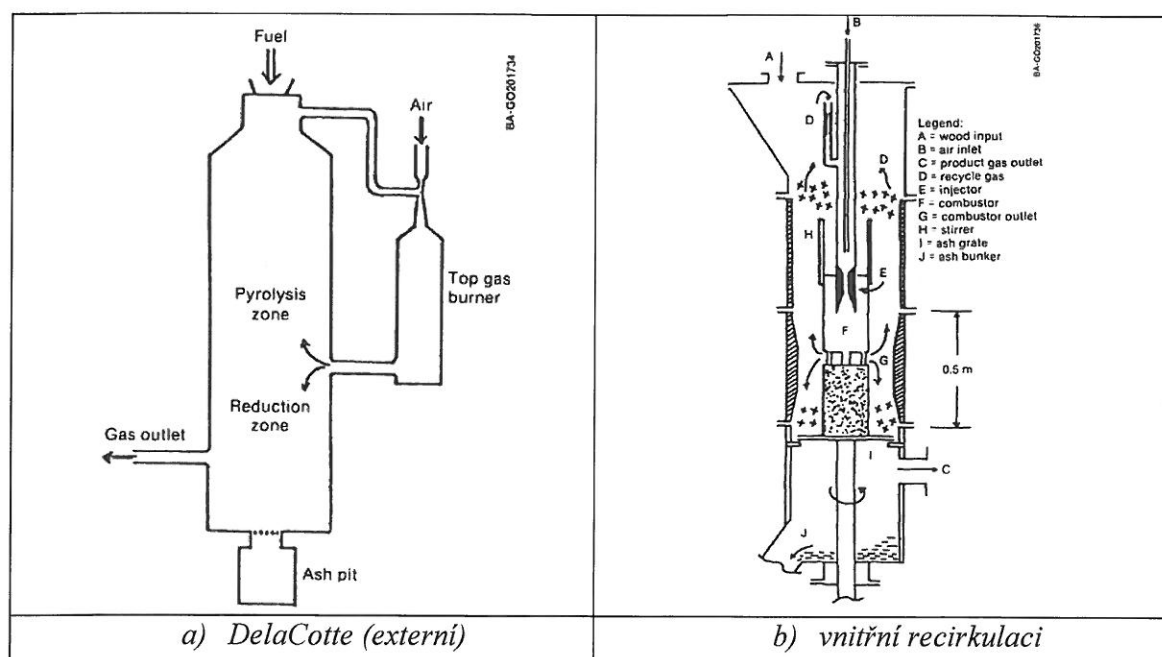
Snížení obsahu dehtu v produkovaném plynu lze jednoduše dosáhnout použitím paliva s nízkým nebo žádným obsahem prchavé hořlaviny a to v nezávislosti na typu použitého generátoru. Příkladem je masové zplyňování dřevního uhlí (DU) během Druhé světové války v automobilových generátorech produkující plyn s minimálním množstvím kondenzátu a dehtu. Použití paliva prostého prchavé hořlaviny se pochopitelně podepíše na složení produkovaného plynu, obsah CH_4 , H_2 , CO_2 , H_2O a výhřevnost plynu se sníží a obsah CO se naopak zvýší. V Tab. 2 je uveden příklad složení plynu produkovaného stejným souproudým generátorem typu „Imbert“ o výkonu cca 100 kW_e produkující plyn ze zplyňování dřevních špalíků a dřevního uhlí [2]. Takto produkovaný plyn je prostý dehtu a pro jeho spalování v motoru je nutno pouze odstranit tuhé znečišťující látky (TZL) a nadbytečnou vlhkost. Nutno však připomenout, že pro výrobu 1 kg DU je zapotřebí použití minimálně 3 kg suchého dřeva a proto uvedený přístup nelze použít u průmyslových aplikací, zaměřených na výrobu elektrické energie z dřevní biomasy.

Logickým pokračováním snah o snižování obsahu dehtu v produkovaném plynu je snaha provést rozdělení jednotlivých procesů probíhajících v generátoru (Obr. 1) do různých, vzájemně oddělených částí termokonverzního zařízení. Na rozdíl od *protiproudého generátoru* tato separace musí být provedena takovým způsobem, aby prchavá hořlavina uvolněná při pyrolýze byla kompletně konvertována (oxidována) na plynné produkty, dříve než může nastat její průnik do produkovaného plynu. Z Obr. 1 je také patrné, že jak pro pyrolýzu (uvolnění prchavé hořlaviny) a obzvláště pro zplyňování uhlíkatého zbytku je nutné dodat dostatečné množství tepelné energie, kterou lze získat komplexní oxidací prchavé

hořlaviny. Otázkou zůstává, jakou konstrukci generátoru použít, aby byly splněny všechny uvedené požadavky?

2.2.1 Generátory s oxidací prchavé hořlaviny v externím hořáku

Konverze prchavé hořlaviny na směs CO_2 , H_2O a využití uvolněného tepla pro pyrolýzu a zplyňování uhlíkatého zbytku bylo realizováno už v souproutém generátoru DeLaCotte vyvinutého v 80. letech minulého století (Obr. 2a). Pyrolýza biomasy nastává v horní a střední části generátoru pomocí části horkých spalin ($1000\text{--}1200^\circ\text{C}$), vzniklých oxidací plynu bohatého na dehet v externí spalovací komoře umístěné mimo generátor. Do ejektorového hořáku spalovací komory se nasává plyn z horní části generátoru. Zbytek horkých spalin vstupuje do dolní části generátoru, kde v redukčním loži reaguje s uhlíkem. Část uhlíkatého zbytku je odváděna v dolní části generátoru ve formě DU. Vystupující plyn obsahuje malé množství dehtu a je vhodný pro pohon spalovacích motorů [5][7]. Účinnost výroby plynu bude o něco nižší než v případě souproutého generátoru a to o hodnotu tepelných ztrát externího hořáku. Dalším vývojem uvedeného přístupu byla oxidace prchavé hořlaviny uvnitř souproutého generátoru s vnitřní recirkulací plynu (viz Obr. 2b)[16]. Zplyňovací vzduch se přivádí do ejektorového hořáku umístěného ve vnitřní části generátoru, pyrolýzní plyny z horní části generátoru jsou nasávány do podtlakového prostoru hořáku, kde jsou oxidovány kyslíkem ze zplyňovacího vzduchu. Intenzitu sání hořáku lze regulovat posunem vzduchového ejektoru (keramické trubky) do těla hořáku. Stupeň redukce obsahu dehtu závisí na poměru mezi recyklovaným plynem (D) a vzduchem (B). Experimenty ukázaly, že za optimálního poměru D/B rovného 0,85 lze snížit obsah dehtu z hodnoty 1400 mg/m^3 (bez recyklace) na hodnotu pod 50 mg/m^3 . Výhodou použití interního hořáku oproti externímu je snížení tepelných ztrát zařízení do okolí [10].

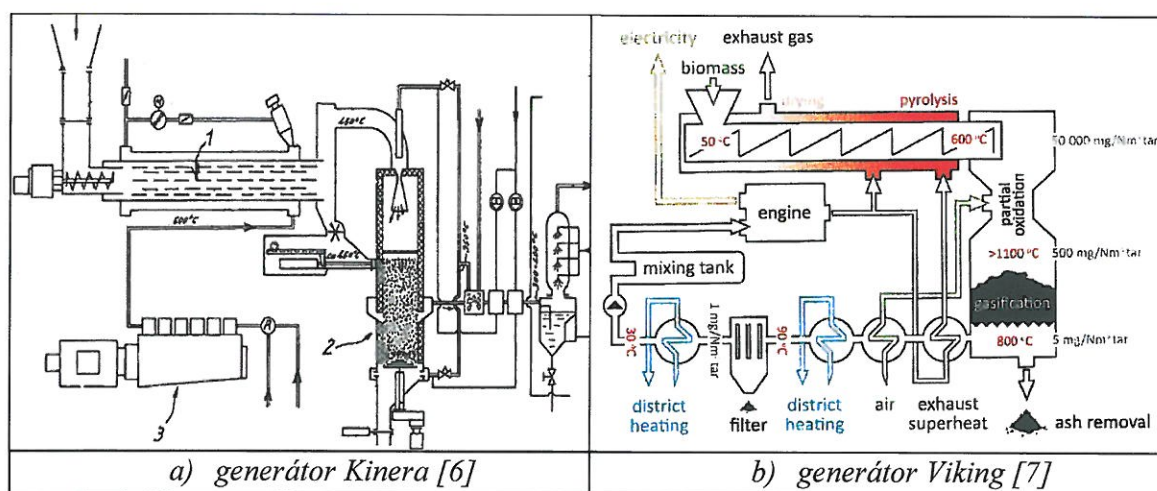


Obr. 2: Zplyňovací generátory s recirkulací a oxidací pyrolýzních plynů

Oxidace prchavé hořlaviny se ukázala jako efektivní způsob snižování celkového obsahu dehtu v produkovaném plynu. Při technické realizaci procesu se také ukázalo, že bohužel nelze úplně zamezit průniku pyrolýzních produktů do čistého plynu. Dalším problémem byla stále nízká celková účinnost výroby studeného plynu.

2.2.2 Vícestupňové generátory s alotermním pyrolyzérem

Ve svém patentu z r. 1980 pan Kiener předložil koncepci vícestupňového generátoru, kde ukázal, jakým způsobem lze rozdělit procesy a tak zajistit dostatek tepla jak pro pyrolyzu, tak i pro endotermní zplyňování uhlíkatého materiálu v redukční části generátoru. Předložený generátor se skládá ze tří částí (Obr. 3a). Ve šnekovém trubkovém pyrolyzáru (1) otápeném spalينami ze spalovacího motoru (3) probíhá pyrolyza, uvolněná prchavá hořlavina je odváděna do hořáku parciálně-oxidační komory (POX), do které se přivádí přehřátý vzduch. Pyrolýzní uhlíkatý zbytek zbavený prchavé hořlaviny je odváděn do redukční části generátoru (2), kterou proudí horké spaliny (1100–1200°C) z oxidační komory. Podél uhlíkatého lože probíhá endotermní heterogenní zplyňování pomocí CO_2 a H_2O , teplota plynu podél lože klesá pod 700°C a plyn je odváděn k dalšímu chlazení a odstraňování TZL. Pro minimalizaci množství nedopalu je možné pod rošt přivádět dodatečný oxidační vzduch, který je po oxidaci zbytkového uhlíku odváděn společně s produkovaným plynem.



Obr. 3: Schéma vícestupňových generátorů pro zplyňování pevných paliv

Úspěšná realizace konceptu vícestupňového zplyňování byla provedena skupinou vědců z DTU, kteří svou vlastní koncepci navrhli před rokem 2000 [3]. Zařízení do značné míry připomíná zařízení navržené v patentu p. Kienera a jeho stručné schéma je uvedeno na Obr. 3b. Pyrolyza probíhá ve šnekovém pyrolyzáru ohříváném přehřátými spalينami ze spalovacího motoru. Teplota na výstupu z pyrolyzáru dosahuje 600°C, karbonizační zbytek spadá do dolní části trubkového reaktoru a uvolněná prchavá hořlavina vstupuje do parciálně-oxidační komory umístěné v horní, zúžené části. Do tohoto místa se také přivádí přehřátý oxidační vzduch spalující prchavou hořlavinu. Teplota stoupá nad 1100°C a směs horkých plynů dále reaguje s uhlíkatým zbytkem v dolní části reaktoru. Po průchodu plynu redukčním ložem a poklesu teploty pod 700°C produkovaný plyn vstupuje do řady chladicích zařízení, filtru, mixtanku a nakonec do spalovacího motoru. Do povědomí odborné veřejnosti se generátor dostal pod jménem „Viking“, a první demonstrační jednotka o tepelném výkonu

75 kW a elektrickém 25 kW byla zprovozněna v roce 2001 [3][7]. Do roku 2003 byla provedena řada testů a experimentů, které ukázaly hlavní výhody generátoru Viking, mezi které patří vysoká účinnost výroby plynu ($\eta_{ce}=93\%$) a nízký obsah dehtu v produkovaném plynu ($\leq 5 \text{ mg/m}^3$). Realizace prvního komerčního projektu o elektrickém výkonu 150 až 200 kW umístěného v blízkosti Hadsundu (Jylland, DK) byla zahájena v roce 2004 firmou WEISS A/S a COWI A/S. Zvýšení výkonu generátoru si vyžádalo vývoj nového šnekového pyrolyzéry a podobného zařízení na sušení dřevní štěpky přehřátou párou [7]. V roce 2010 byla firmou WEISS zahájena stavba zařízení s elektrickým výkonem 500 kW umístěného v lokalitě Hillerød (okres Copenhagen, DK), jehož dokončení a zprovoznění mělo proběhnout koncem roku 2013 [17].

Ukazuje se, že problémem praktické realizace vícestupňového generátoru typu Viking s vyšším výkonem je složitost technického řešení alotermního šnekového pyrolyzéry, jehož provoz by měl zaručit kompletní pyrolýzu vstupního materiálu. Právě jeho složitost, provozní spolehlivost a s tím spojené požadavky na kvalitu paliva mohou být hlavní překážkou úspěšné komercializace celého projektu Viking [17].

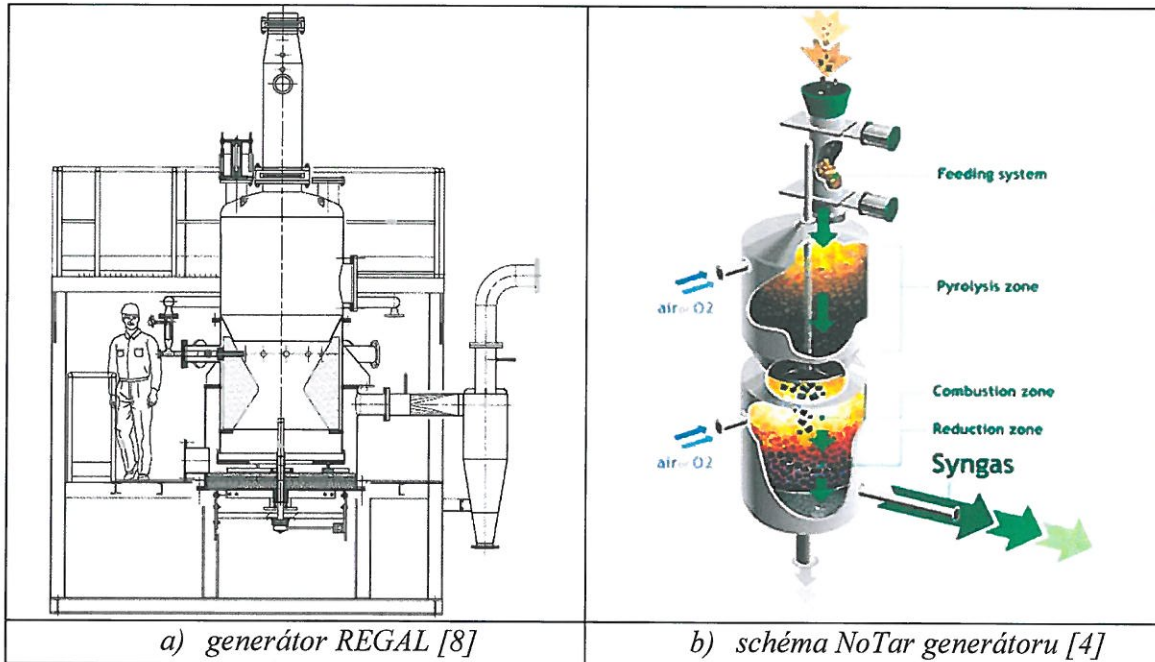
2.2.3 Vícestupňové generátory s autotermní pyrolýzní jednotkou

Řešení problémů spojených s přestupem tepla při pyrolýze vedlo ke vzniku dalšího typu vícestupňových generátorů. Teplo potřebné pro pyrolýzu je získáváno spalováním malé části paliva přímo v pyrolyzéry, kde průměrná teplota stoupá nad $600 \text{ }^\circ\text{C}$, uvolňuje se prchavá hořlavina a vzniká dřevěné uhlí. V další zóně je oxidována prchavá hořlavina a horké produkty s redukováným obsahem dehtu vstupují do redukčního lože. Uvedené konstrukční řešení zjednodušuje a zlevňuje celé zařízení, ale zároveň snižuje i účinnost výroby plynu (η_{ce}). Podobným generátorům se také často říká generátory s dvojitým ohněm (*twin-fire gaffier*). Bohužel vzhledem k rozsahu příspěvku není možné popsat všechny typy těchto zařízení, kombinujících souproudé a protiproudé schéma toku plynu a paliva uvnitř generátoru [15]. Proto se příspěvek zaměřuje hlavně na zařízení, umožňující zredukovat obsah dehtu v plynu a zvýšit účinnost výroby plynu.

Belgický XyloWatt společně s univerzitou UCL vyvinuli vlastní vícestupňový generátor NoTar, produkují plyn s nízkým obsahem dehtu [4]. Generátor vznikl optimalizací a úpravami vlastního souproudého sesuvného generátoru Miogen (100 kW) a Regal (300 kW)[8]. Původní souproudý generátor je uveden na Obr. 4a a pracuje na obdobném principu jako souproudý generátor typu „Imbert“. V zúžené dolní části konstrukce se přivádí zplyňovací vzduch a vzniká oxidační pásma, pod ním je umístěno pásma redukční. Při zvyšování velikosti generátoru se začínají objevovat problémy typické pro souproude hrdlové generátory, vedoucí ke zvýšení obsahu dehtu v plynu.

U modifikovaného generátoru NoTar bylo provedeno rozdělení souvislé vrstvy paliva uvnitř generátoru a byl přidán další vstup oxidačního media. V důsledku toho vznikly tři oblasti (Obr. 4b). V horní části generátoru NoTar se nachází autotermní pyrolyzér s regulovaným přívodem vzduchu a řízeným posunem uhlíkatého zbytku do druhé části generátoru. Pod pyrolyzérem je volný prostor, v němž se nachází oxidační zóna. Redukční zóna je umístěna ještě níže a hladina dřevěného uhlí v ní se reguluje jednak přívodem čerstvého dřevěného uhlí, a dále řízením odvodu popela do výsypky. Významnou možností regulace je především regulace a rozdělení průtoku vzduchu do jednotlivých částí generátoru. Tímto jsou ovlivněny také teploty jednotlivých zón generátoru a procesů probíhajících uvnitř. Důležitou roli hraje také rychlost úbytku paliva v pyrolyzéry.

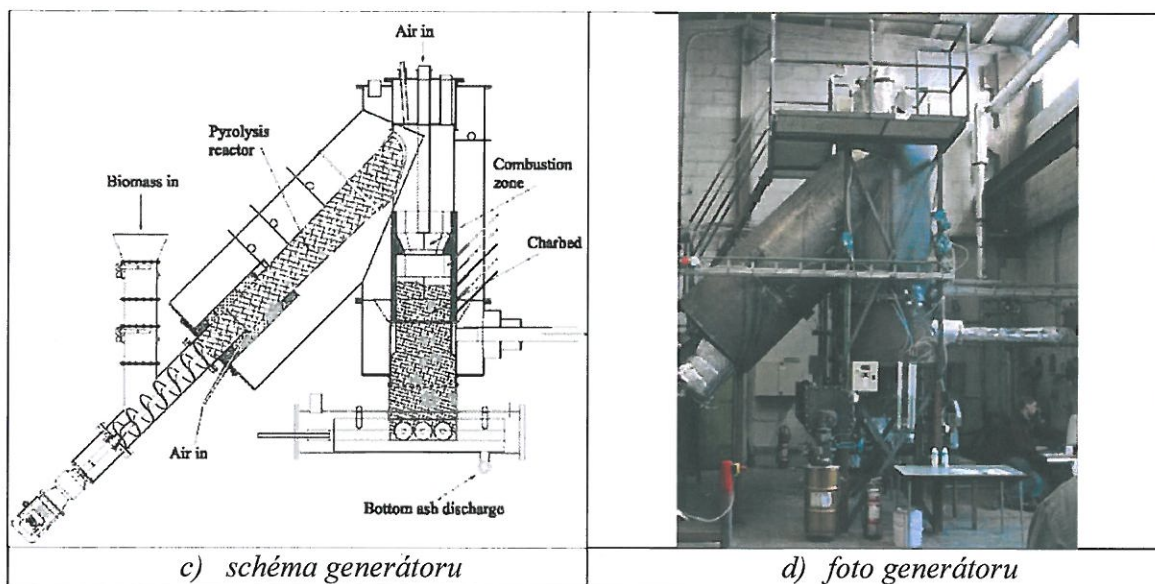
Spalování prchavé hořlaviny v oxidační části NoTar generátoru umožňuje snížení obsahu dehtu na hodnotu pod 100 mg/m^3 . Součástí jednotky je také zařízení na úpravu a čištění plynu pro jeho použití pro pohon spalovacích motorů. NoTar generátor může být provozován také v přetlaku a jako oxidační medium může být použit i čistý kyslík. Jako palivo lze také použít i různé typy odpadních materiálů. Společnost XyloWatt v současné době provozuje více než 5 průmyslových aplikací s tepelným výkonem 1 až 3 MW.[4][7]



Obr. 4 Zplyňovací generátory společnosti XyloWatt [4][8]

Originální konstrukce třístupňového generátoru (Obr. 5a), využívajícího autotermní pyrolýzy byla navržena Tomášem Kochem (TK Energi A/S). Pyrolýza probíhá v šikmém pyrolýzéro pomocí tepla uvolněného spalováním malého množství paliva primárním vzduchem. Uhlíkatý zbytek spadá do redukční lože, umístěného v dolní části vertikálního souproudeho generátoru. Prchavá hořlavina je spalována sekundárním vzduchem v parciálně-oxidační komoře v horní části reaktoru, poté horké spaliny vstupují do redukční zóny nad roštem, kde zplyňují uhlíkatý zbytek.

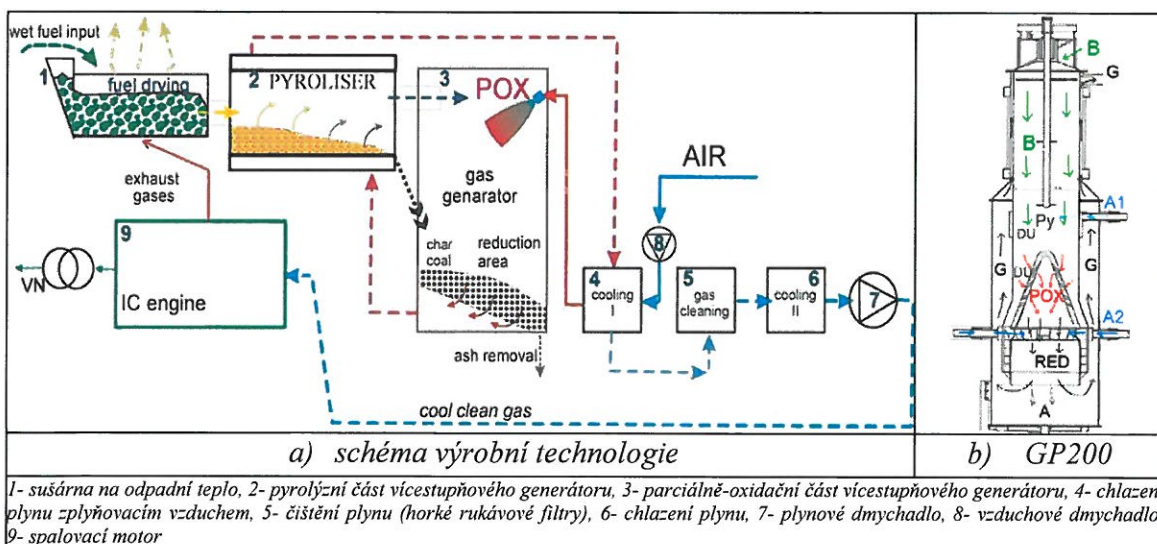
Své aktivity firma TK Energi A/S zahájila v roce 1990, po roce 1998 měla postavenou první demonstrační jednotku o elektrickém výkonu 50 kW (200 kW_t) v Køge (DK), která byla do roku 2005 provozována asi 1500 h a v současné době je mimo provoz. Obdobný projekt se realizoval v Japonsku (50 kW_e , 2004) a v laboratořích CIRADu (Francie), kde byl generátor zdrojem reálného plynu pro provoz vysokoteplotních palivových článků (2004, Green Fuel Cell, GFC,503122, SES6). Nejvýkonnějším provozovaným generátorem bylo zařízení s elektrickým výkonem 125 kW. Produkovaný plyn obsahoval nízké množství dehtu ($<20 \text{ mg/m}^3$) a celková elektrická účinnost zařízení dosahovala hodnoty 30 % v přepočtu na vstupní palivo. Největší projektovanou, ale nezprovozněnou aplikací byla jednotka v Gjol (DK,2006) s elektrickým výkonem 700 kW. Kvůli snížení dotace na stavbu a poklesu výkupních cen elektřiny nebylo zařízení nikdy dokončeno a zprovozněno. Generátor je schopný zpracovat i palivo s jemnou frakcí, ale před procesem je nutno palivo vysušit, k čemuž se používá sušárna na odpadní teplo.



Obr. 5 Třístupňový zplyňovací generátor TK Energi A/S o elektrickém výkonu 125 kW

2.2.4 Vícestupňový generátor s kombinovanou pyrolýzní jednotkou

V roce 2010 firma TARPO s.r.o. vypracovala vlastní koncept vícestupňového zplyňování biomasy. Zjednodušené schéma celého procesu je uvedeno na Obr. 6a. Principiální schéma a funkce vlastního generátoru zajišťujícího proces je poněkud odlišná od již diskutovaných typů generátoru a je schematicky znázorněno na Obr. 6b.



1- sušárna na odpadní teplo, 2- pyrolýzní část vícestupňového generátoru, 3- parciálně-oxidační část vícestupňového generátoru, 4- chlazení plynu zplyňovacím vzduchem, 5- čištění plynu (horké rukávové filtry), 6- chlazení plynu, 7- plynové dmychadlo, 8- vzduchové dmychadlo, 9- spalovací motor

Obr. 6 Vícestupňový generátor Tarpo GP200

Funkce generátoru spočívá v prostorovém rozdělení termochemických procesů do několika oblastí: pyrolýzní (Py), parciálně oxidační (POX) a redukční (RED). Realizace je zajištěna pomocí speciálního keramického kuželu (ve formě obráceného „V“) umístěného do vnitřního prostoru generátoru. Konstrukce kužele, jeho vlastnosti a materiál použitý pro výrobu patří k „know-how“ firmy TARPO s.r.o. V pyrolýzní části (Py) nastává ohřev předem vysušeného

dřeva na teplotu 450°C až 550°C. Na rozdíl od výše popsaných typů generátorů se pro uvolnění prchavé hořlaviny v pyrolýzní části používá kombinace jak tepla získaného oxidací části paliva primárním vzduchem (stejně jako u generátoru NoTar i TK Energi), tak i externího tepla prostupujícího povrchem kuželu (radiace, vedení) nebo vnější stěnou pyrolyzérů (podobně jako u generátoru Viking), okolo které proudí horký plyn vystupující z redukční zóny (RED). Uvolněná prchavá hořlavina je ihned odváděna do parciálně oxidační komory (POX) lokalizované uvnitř kužele. V POX komoře nastává dokonalé mísení prchavé hořlaviny s přiváděným zplyňovacím vzduchem (A2), kdy v důsledku intenzivního spalování se zvyšuje teplota nad hodnotu 1000°C. Horké plyny obsahující převážně CO₂, CO, H₂O a CH₄ dále vstupují do kontaktu s redukčním uhlíkovým ložem (RED), prochází roštem a pláštěm generátoru, kde předávají své teplo palivu v pyrolýzní části. Uvedený generátor má vcelku kompaktní konstrukci. Součástí celé linky je také sušárna na odpadní teplo, která umožňuje zlepšit energetickou bilanci celé kogenerační jednotky. Palivo vstupující do generátoru obsahuje do 5 % vlhkosti, generátor je schopný zpracovat palivo s obsahem vlhkosti až do 30 %hm, což se projeví na obsahu vodíku v plynu.

Tab. 1. Přehled vícestupňových generátorů využívajících design TARPO

Lokalita	Zahájení provozu. Typ generátoru	Typ spalovacího motoru a jeho pracovní objem	Instalovaný výkon
1. Kněžveses(CZ)	2012, GP200	ČKD, 2x6S160, 27l, R6	200 kW _e
2. Odry (CZ)	2012, 2xGP500	Jenbacher 2xJ316, (48l, V16)	2x500 kW _e
3. Olešnice (CZ)	2013/2014, GP200XL	ČKD, 2x6S160, 27l, R6	200 kW _e
4. Handlová (SK)	2014/2015, 2xGP750	Guascor, FBLD560, (56l, V16)	2x700 kW _e
5. Dobříš (CZ)	2015, 1xGP750	Guascor, FBLD480, (48l, V16)	650 kW _e (+využití plynu)
6. Kozomín (CZ)	2014/2015, 5xGP750	Jenbacher, 3xJ320, (60l, V20)	2,1 MW _e (3x0,71) 5,1 MW _t



Obr. 7 Lokalizace jednotlivých zařízení využívajících vícestupňové generátory v ČR

Koncem roku 2011 byl postaven a úspěšně zprovozněn prototyp dvoustupňového generátoru (GP200) o elektrickém výkonu 200 kW, který nahradil již dříve používaný souproudý generátor GP300 [14]. První provozní zkušenosti ihned ukázaly hlavní výhody navrženého vícestupňového generátoru. Celková elektrická účinnost stávající elektrárny se zvýšila z 25% na 27 %. Obsah dehtu v plynu za generátorem se pohyboval od 2 do 25 mg/m³ v závislosti na

teplotě parciálně-oxidační zóny. Po několikaměsíčním provozu byla z čisticí linky generátoru odpojena i olejová pračka, jejíž čisticí funkce se ukázala málo efektivní [5]. Vysoká čistota plynu a nízký obsah dehtu byly hlavními důvody rychlého zahájení komercializace kogeneračních jednotek, využívajících technologie vícestupňového generátoru.

V roce 2011 společně s firmou AIR TECHNIC s.r.o byla zahájena příprava realizace prvního komerčního projektu v Odrách využívající dvoustupňový generátoru řady GP500. Jedná se o zvětšenou variantu generátoru GP200 s určitými konstrukčními úpravami a inovacemi. V prostoru elektrárny v Odrách jsou realizovány dvě stejné nezávislé výrobní linky o výkonu 500 kW_e, obě linky používají pro spalování plynu moderní plynové motory Jenbacher J316 s účinností výroby elektrické energie až 34 %, vztahené na plyn ze zplyňování biomasy. Zkušební provoz první linky generátoru byl zahájen na konci roku 2012. První výsledky kvality produkovaného plynu byly podobné výsledkům získaným na prototypovém zařízení GP200, přesto do stálého komerčního provozu celé kogenerační linky byl zapojen až na začátku roku 2014, kdy byly provedeny všechny potřebné úpravy a optimalizace generátoru a dalších součástí celé technologie (sušicí a třídící linka). V roce 2014 kogenerační jednotka na lince č.2 odpracovala více než 6500 provozních hodin.

Stručný popis všech dnes známých zařízení realizovaných na bázi uvedeného dvoustupňového generátoru TARPO o různém výkonu (řady GP200, GP200XL, GP500 a GP750) je shrnut v Tab. 1 a jejich umístění v ČR a SR je uvedeno na Obr. 7 [11][12]. Generátor GP200 je v provozu od roku 2012, GP500 od 2013, GP200XL od konce roku 2014. Největší výkonnostní řada vícestupňových generátorů GP750 je v zkušebním provozu od druhé půlky roku 2014.

Všeobecně lze konstatovat, že nejmenší výkonnostní řady vícestupňových generátoru TARPO jsou méně náchylné ke změnám provozních podmínek a při dodržování optimálních podmínek produkují plyn s nízkým obsahem dehtu. Měření provedená na nejvýkonnější řadě vícestupňového generátoru TARPO GP750 umístěného v Handlové a Kozomíně ukázaly, že složení plynu a obsah dehtu značně závisí na způsobu provozu generátoru, vlastnostech paliva a poměru primárního a sekundárního vzduchu. Při nevhodných režimech může nastat průnik prchavé hořlaviny skrze parciálně-oxidační komoru, což může způsobit nárůst obsahu dehtu v plynu. Pro zamezení tohoto negativního efektu je zapotřebí dodržovat optimální poměr primárního a sekundárního vzduchu v rozmezí 1:5 až 1:10 v závislosti na výkonu generátoru, vlhkosti paliva a intenzitě roštování. Předběžné výsledky průměrného složení plynu a obsahu dehtu naměřených při zkušebním provozu na generátoru G750 jsou uvedeny v Tab. 2. Po získání více znalostí o složení plynu a obsahu dehtu za různých provozních režimů generátoru plánují autoři přípravu publikace věnované této problematice.

3 Srovnání plynu produkovaného vícestupňovými generátory

Bohužel z dostupných zdrojů se nepovedlo získat údaje o složení plynu produkovaného všemi zde uvedenými typy vícestupňových generátorů. Základní složky plynu jsou uvedeny v Tab. 2. Pro srovnání je v tabulce také uvedeno složení plynu ze souproudeho vrstevnatého (GP300) [14] a souproudeho generátoru typu Imbert o výkonu 100kW_e [2].

Ze složení plynu a obsahu dehtu lze určit kvalitu plynu a vhodnost jeho dalšího použití pro energetické a chemické aplikace. Při použití stejného paliva (dřevní hmota) lze na základě porovnání složení plynu provést přibližné srovnání účinností výroby plynu (η_{ce}). Obsah dusíku v plynu je přímo úměrný množství vzduchu použitého pro výrobu plynu. Účinnější bude ten generátor, který pro výrobu plynu spotřebuje méně vzduchu vztaheného na hmotnostní jednotku paliva a vyrobený plyn bude obsahovat menší množství dusíku.

Nejmenší množství N_2 je v plynu produkovaném generátorem Viking, který díky použitému šnekovému pyrolyzáru využívá odpadní teplo spalin z motoru a tak má největší účinnost výroby plynu ($\eta_{ce}=95\%$). Nízký obsah dusíku je také způsoben vysokým obsahem vlhkosti v použitém palivu, která prostřednictvím homogenní reakce vodního plynu a heterogenního zplyňování ovlivňuje složení produkovaného plynu a tak navyšuje celkovou produkci plynu. Lze předpokládat, že pro palivo obsahující pod 10 %hm. vlhkosti se obsah dusíku zvýší na hodnotu okolo cca 38 %obj. Pravděpodobně nejnižší účinnost má dvoustupňový generátor od firmy XyloWatt a to zřejmě v důsledku použité konstrukce generátoru. Účinnost NoTar generátoru je srovnatelná s účinností souproutého generátoru od společnosti TARPO spol. s r.o. GP300 který produkuje plyn o podobném složení. Výhodou generátoru NoTar je produkce plynu s nižším obsahem dehtu. Bohužel se nepovedlo získat informace o složení plynu produkovaného třístupňovým generátorem od firmy TK Energi A/B. Také lze konstatovat, že vícestupňové generátory navržené společností TARPO s.r.o. díky kombinovanému způsobu pyrolýzy vykazují vyšší účinnost výroby plynu, než diskutované zařízení, vyjma generátoru Viking

Tab. 2 Srovnání složení plynu z různých vícestupňových generátorů

Typ zařízení		Souproutý Imbert ¹		XyloWatt NoTar		DTU Viking (75kW)	TARPO s.r.o.			
		dřevo	Dřevné uhlí	vzduch	O ₂		GP300 ²	GP200	GP500	GP750
Vlhkost paliva	% hm.	<10	<2	<10	<10	35-45	<10	<10	<10	<10
CO	% obj.	24,6	30,2	22,5	43,6	19,6	25,5	26,7	25,0	27,7
H ₂	% obj.	16,4	4,6	17,6	34,0	30,5	17,2	23,0	22,3	22,4
CH ₄	% obj.	2,2	0,05	2,0	0,8	1,2	3,0	1,1	2,0	1,0
CO ₂	% obj.	9,6	2,8	10,5	18,4	15,4	9,6	8,0	9,5	8,1
N ₂	% obj.	46,1	62,0	45,1	3,2	33,3	43,5	40,6	41,1	40,4
Ostatní	% obj.	1,1	0,35	2,3	0	0	1,2	0,6	0,1	0,2
Obsah dehtu	mg/m ³	1300-2000	<5	<100	<100	<5	1000-2000	0,5-2,0	5,0-40,0	26,5-98,7
Q _i (15°C)	MJ/m ³	5,7	4,1	5,4	9,5	5,6	6,3	5,9	5,9	6,3

¹ provoz modifikovaného generátoru „Imbert“ od firmy BossEngineering v obci Louka provozován na dřevěné uhlí [2].

² GP300 je souproutý generátor vrstevnatého typu používány firmou TARPO s.r.o. ve vlastní elektrárně do r. 2012. [14]

Kvalitu produkovaného plynu lze zhodnotit přímo podle obsahu dehtu a nepřímo podle obsahu metanu, případně dalších uhlovodíků. Čím je jejich obsah menší, tím menší obsah dehtu lze očekávat i v produkovaném plynu. Obsah metanu v plynu z dvoustupňových generátorů je díky oxidaci složek prchavé hořlaviny v POX komoře nižší než u souproutých

generátorů. Díky vysokým teplotám v parciálně-oxidační zóně a následné reakci spalin (CO_2 , H_2O) s uhlíkatým materiálem redukčního lože je obsah CO_2 v plynu nízký a CO naopak vysoký.

Jak už bylo zmíněno (viz Tab. 2.), prchavá hořlavina je hlavním zdrojem dehtu v plynu. Při použití paliva s minimálním nebo žádným obsahem prchavé hořlaviny, například DU, lze produkovat plyn s minimálním obsahem metanu případně dalších uhlovodíků a dehtu. V důsledku absence prchavé hořlaviny má produkováný plyn i odlišné složení, projevující se vysokým obsahem CO a N_2 a nízkým CH_4 , CO_2 a H_2 . Tyto změny se projeví na výhřevnosti plynu, která se sníží a také jeho spalovacích vlastnostech a motorových emisích. Jak je vidět, plyn z dobře fungujících vícestupňových generátorů obsahuje nižší množství metanu, uhlovodíků a CO_2 , než ze souproutých generátorů, a naopak obsah CO a H_2 je vyšší než u souproutých generátorů.

4 Závěr

Vícestupňový generátor je bez pochyby dalším milníkem ve vývoji lokálních zařízení pro efektivní zplyňování biopaliv. Oproti známým souproutým generátorům umožňuje dosáhnout efektivnější výroby plynu s nižším obsahem dehtu, což značně zjednodušuje čištění plynu a jeho další použití. V současné době je známo několik odlišných konstrukcí generátorů, odlišujících se způsobem pyrolýzy původního materiálu. Nejeefektivnější a zároveň i nejsložitější je vícestupňový generátor Viking, využívající externího šnekového pyrolýzoru otápeného spalinami z motoru. Existují i jiné typy reaktorů využívající přídavek malého množství vzduchu pro oxidaci části paliva přímo v pyrolýzoru (NoTar, TK Energy), nebo zařízení kombinující oba uvedené způsoby pyrolýzy (TARPO GP750). Jejich účinnost bývá o něco nižší než v případě generátoru Viking.

V současné době je v ČR realizováno několik projektů zaměřených na provoz vícestupňových generátorů, momentálně probíhají práce zaměřené na optimalizaci provozu generátoru GP750. První zkušenosti s jeho provozem ukazují na to, že generátor je schopný produkovat plyn akceptovatelné kvality s nízkým obsahem dehtu. Zároveň se také ukazuje, že existuje více parametrů ovlivňujících složení a kvalitu produkovaného plynu. Právě optimalizací provozních podmínek vedoucích k zajištění stabilního složení, vysoké účinnosti a nízkého obsahu dehtu v produkovaném plynu budou věnovány další práce. Předběžné výsledky získané z několika měsíčního provozu lze charakterizovat jako velice nadějně a uspokojivě.

Poděkování

Část práce prezentovaná v uvedené publikaci vznikla díky finanční podpoře projektu Technologické agentury České republiky číslo TA04020583.

Použitá literatura

- [1] Barrio M., Experimental investigation of small-scale gasification of woody biomass. Ph. D. Thesis, NTNU, 2002
- [2] Beňo Z., Buryan P., Skoblia S., Výroba elektrické energie z dřevní štěpky v komplexní kogenerační jednotce, technická zpráva, FT-TI1/219, 50 s, VŠCHT Praha, srpen 2011.
- [3] Brandt, P., Larsen E., Henriksen U., High tar reduction in a two-stage gasifier, Energy and Fuels, 14, 816–819, 2000.

- [4] <http://www.xylowatt.com/index.php/solutions/the-notar-gasifier.html>.
- [5] Kaupp A. and Gross J. R., State of The Art for Small (2-50 kW) Gas Producer Engine System, Final Report to USDA, Forest Service, Contract No 53 – 39R-0-141, 1981.
- [6] KIENER Karl, Process and plant for the gaziefication of solid fuel. Patent. C10J 3/66 [WO 81/00112] 4.Juli.1979/ 5.Juli.1980.
- [7] Knoef H.A.M., Handbook of Biomass Gasification. Second Edition. BTG, 2012.
- [8] Kržin I., Kvalita plynu ze zplyňování dřeva, DP, VĚC VŠB-TU Ostrava, 2008.
- [9] Picek I. Zařízení pro vícestupňové zplyňování uhlíkatých paliv, přihláška užitého vzoru, přijato 18.12.2013, PUV 2013_28958.
- [10] Reed T.B., Das A. Handbook of Downdraft Gasifier Engine Systems. The Boiomass Energy Foundation Press, 1998.
- [11] Skoblia S., Picek I., Beňo Z., Pohořelý M., Design and commercial application of two-stage fixed bed gasifier in Czech Republic, 6th International Freiberg Conference Coal Conversion and Syngas, s. 15. 19.05-22.05.2014, Dresden, Germany.
- [12] Skoblia S., Picek I., Beňo Z., Pohořelý M., Schemes and new developments in combination of gasification with fuel gas cleaning for power generation in piston gas engines and gas turbines, Fecundus International Workshop New Procesess for Fuel Conversion, Gas Cleaning and CO₂ Separation in FB and EF Gasification of Coal, Biomas and Waste, Prague (CZ), 2013-06-12 / 2013-06-14.
- [13] Skoblia S., Picek I., Beňo Z., Pohořelý M., Vícestupňové zplyňování - dlouhá cesta od myšlenky k realizaci, Nové technologie pro EVO pyrolýzou a zplyňováním, 5. prosince 2013, Jihlava.
- [14] Skoblia S., Picek I., Beňo Z., Pohořelý M., Vývoj malých a středních kogeneračních jednotek na biomasu a jejich aplikace v praxi, Sborník příspěvků z odborné konference. Brno: VUT v Brně, 2012 - (Špiláček, M.; Lisý, M.), s. 103-119, ISBN 978-80-214-4685-4.
- [15] Surjosatyo A., Vidian F., Nugroho Z.S., A review on gasifier modification for tar reduction in biomass gasification. Jurnal Mekanikal, December 2010, No. 31, 62 – 77.
- [16] Susanto H., Beenackers A.C.M., A Moving-bed Gasifier with Internal Recycle of Pyrolysis Gas, Fuel, Volume 75, Number 11, 1339-1347, 1996.
- [17] WEISS A/S, Demonstration of 500 kW_E Two stage Gasifier, Final Report, March 2013.