



Zkušenosti s provozem vícestupňových generátorů v ČR

Siarhei SKOBLIA¹, Zdeněk BEŇO¹, Jiří BRYNDA¹, Michael POHOŘELÝ^{2,3}, Ivo PICEK⁴

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

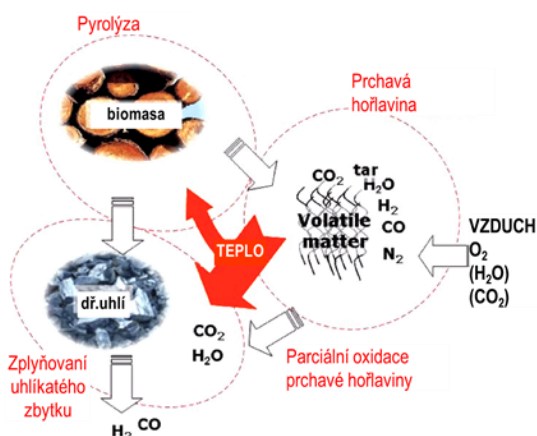
* Email: skobljas@vscht.cz, pohorely@icpf.cas.cz

Příspěvek se zabývá možností výroby elektrické energie a tepla z biomasy pomocí technologie vícestupňového zplyňování a je věnován především problematice snižování obsahu dehtu v plynu. V práci jsou uvedeny praktické zkušenosti s provozem řady vícestupňových generátorů vyvinutých v ČR s elektrickým výkonem od 200 do 750 kW.

Klíčová slova: zplyňování biomasy, složení plynu, obsah dehtu, generátory v ČR

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 výrobu syntézních a hořlavých plynů pro různá průmyslová odvětví, v období válek a energetických krizí sloužily pro pohon dopravních prostředků. Více než 100 let byly pro spalování plynných paliv používány spalovací motory, s časem stoupal jejich výkon, rostla účinnost a spolehlivost. Současně s tím stoupaly i požadavky na kvalitu plynných paliv vyžadující u běžných typů generátorů lepší a kvalitnější čištění plynu zvyšující investiční a provozní náklady celé technologie. Jedním z nejvíce hlídaných parametrů bezesporu byl obsah dehtu v plynu.



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



Zplyňování biomasy je termochemickou přeměnou pevných uhlíkatých materiálů na plynná paliva působením zplyňovacího média za vysokých teplot v generátoru. Zplyňování má komplexní povahu a skládá se z více různě rychlých a tepelně zabarvených procesů probíhajících v generátoru (Obr. 1). Podíl produktů jednotlivých procesů na finálním složení plynu, i obsah 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 výsledného plynu. V běžně používaných typech generátorů s pevným ložem produkty uvedených procesů (Obr. 1) se často promíchávají a tak způsobují průnik nežádoucích složek do finálního plynu a zhoršení jeho kvality.

2 Cesty ke snižování obsahu dehtu v plynu

Prchavá hořlavina, jejíž podíl v biomase dosahuje až 80 %, je de facto hlavním zdrojem dehtu v plynu a způsob její transformace v generátoru má hlavní vliv na obsah a složení dehtu v produkovaném plynu. Snižováním obsahu prchavé hořlaviny v palivu tak lze efektivně snížit i obsah dehtu v plynu. Příkladem uvedené optimalizace zplyňovacích generátorů jsou masové historické příklady zplyňování dřevního uhlí (DU) během Druhé světové války v automobilových generátorech různých konstrukcí. V Tab. 3 je uvedeno složení plynu produkovaného souproudým generátorem typu „Imbert“ jak ze zplyňování dřevních špalíků, tak i DU [2]. Plyn z DU má nižší výhřevnost, ale je prostý dehtu a pro jeho spalování v motoru je nutno pouze odstranit tuhé znečišťující látky (TZL) a nadbytečnou vlhkost. Bohužel použití DU není ekonomicky výhodné při zplyňování dřeva vzhledem k nízkým výtěžkům DU při karbonizaci. Vývoj generátorů produkujících plyn s nízkým obsahem dehtu se soustředil na zařízení, kde jednotlivé procesy uvedené na Obr. 1 jsou separovány do různých částí generátoru. Separace jednotlivých zón ovšem musí být provedena takovým způsobem, aby prchavá hořlavina uvolněná při pyrolýze v jedné části zařízení byla kompletně konvertována (oxidována) na plynné produkty prosté dehtu v oxidační části zařízení dříve, než se dostanou do kontaktu s redukční zónou. Pro realizaci podobného typu generátoru bylo zároveň nutno vyřešit další problém spojený se zajištěním přívodu potřebného reakčního tepla nezbytného pro pyrolýzu (uvolnění prchavé hořlaviny) a zplyňování uhlíkatého zbytku.

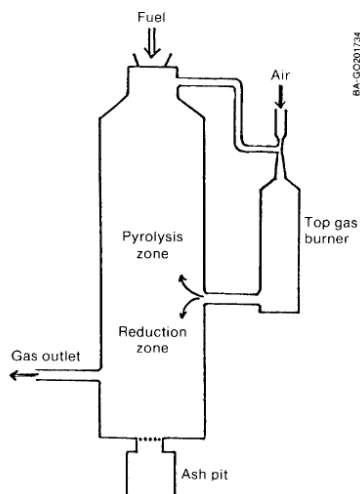
2.1 Generátory s oxidací prchavé hořlaviny v hořáku

Konverze prchavé hořlaviny na směs CO_2 a H_2O s využitím uvolněného tepla pro pyrolýzu a zplyňování uhlíkatého zbytku byla poprvé realizována v souproudém generátoru DeLaCotte vyvinutém v 80. letech minulého století (Obr. 2a). Pyrolýza biomasy probíhá v horní a střední části generátoru pomocí horkých spalín ($1000\text{--}1200^\circ\text{C}$) vznikajících v externím ejektorovém hořáku, kam se nasává pyrolýzní plyn z horní části generátoru. Část horkých spalín vstupuje do dolní části generátoru, kde v redukčním loži reaguje s uhlíkem za vzniku plynu s nízkým obsahem dehtu. Nevýhodou DeLaCotte-generátoru je snížená účinnost výroby studeného plynu způsobená použitím externího hořáku [5][7].

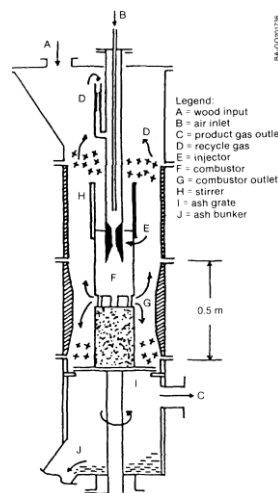
Podobným způsobem probíhá oxidace prchavé hořlaviny uvnitř souproudého generátoru s vnitřní recirkulací plynu (viz Obr. 2b), jehož hlavní výhodou oproti DeLaCotte-generátoru je snížení tepelných ztrát zařízení do okolí [10][16]. Zplyňovací vzduch se přivádí do ejektorového hořáku umístěného ve vnitřní části generátoru, pyrolýzní plyny z horní části generátoru jsou nasávány do podtlakového prostoru hořáku, kde jsou oxidovány. Intenzitu sání



hořáku lze regulovat polohou vzduchového ejektoru uvnitř těla generátoru. Obsah 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 na hodnotu pod 50 mg/m^3 . Oxidace prchavé hořlaviny se ukázala jako efektivní způsob snižování celkového obsahu dehtu v produkovaném plynu. Bohužel se také ukázalo, že u obou typů generátorů nelze úplně zamezit průniku pyrolýzních produktů do produkovaného plynu.



a) DelaCotte (s externí recirkulací)



b) Generátor s vnitřní recirkulací

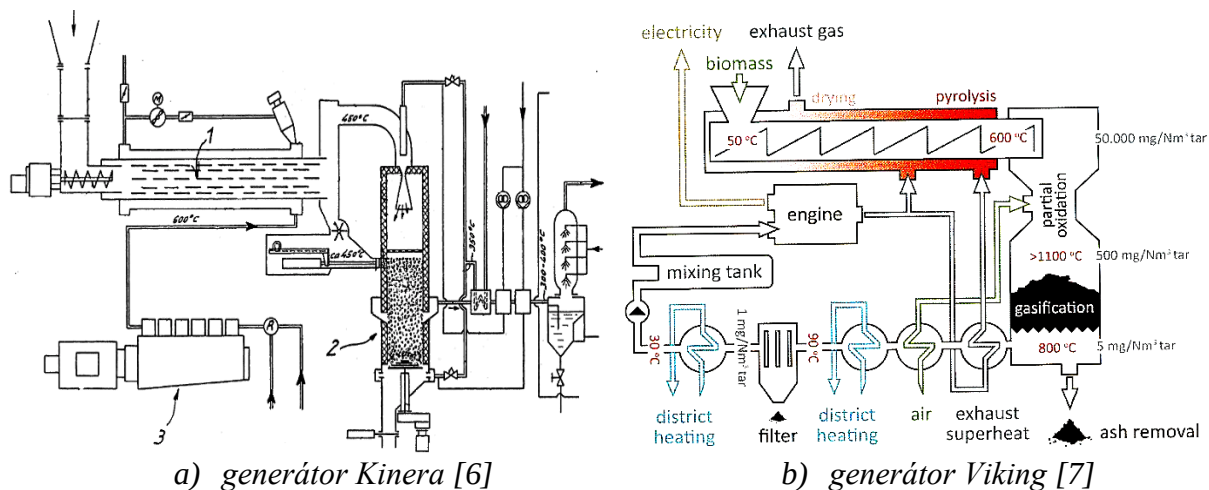
Obr. 2: Zplyňovací generátory s recirkulací a oxidací pyrolýzních plynů

2.2 Vícetupňové generátory s alotermním pyrolyzérem

Vícetupňový generátor (Obr. 3a), navržený Kienerem v roce 1980, ukázal cestu, jak lze jednotlivé procesy (Obr. 1) rozdělit do různých zón a zároveň zajistit dostatek tepla pro pyrolýzu i endotermní zplyňování uhlíkatého materiálu v redukční části generátoru. Pyrolýza probíhá ve šnekovém trubkovém pyrolyzáru (1) otápeném spalinami ze spalovacího motoru (3). Uvolněná prchavá hořlavina je odváděna do hořáku parciálně-oxidační komory (POX), do které se přivádí přehřátý vzduch. Pyrolýzní zbytek je odváděn do redukční části generátoru (2), kde probíhá endotermní heterogenní zplyňování pomocí CO_2 a H_2O ($>1200^\circ\text{C}$) z POX. Ověření provozuschopnosti konceptu vícetupňového zplyňování navrženého Kienerem bylo úspěšně provedeno na generátoru Viking vyvinutého skupinou vědců z DTU [3]. Uvolnění prchavé hořlaviny probíhá ve šnekovém pyrolyzáru ohříváném horkými spalinami ze spalovacího motoru (Obr. 3b). Karbonizační zbytek spadá do redukčního lože v dolní části trubkového reaktoru a prchavá hořlavina vstupuje do parciálně-oxidační komory umístěné v horní části generátoru. Teplota v POX stoupá nad 1200°C a směs horkých plynů dále reaguje s uhlíkatým zbytkem redukčního lože, kde díky endotermním reakcím se plyn ochlazuje pod 700°C a dále po zchlazení a odstranění TZL vstupuje do spalovacího motoru. První demonstrační jednotka o elektrickém výkonu 25 kW (tepelném 75 kW) byla zprovozněna v roce 2001 [3][7]. Do roku 2003 byla provedena řada experimentů, které ukázaly hlavní výhody konceptu 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 150–200 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 pyrolyzáru 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 už koncem roku 2013 [17]. Ukázalo se, že problémem zvyšování výkonu vícestupňového generátoru Viking je složitost technického řešení alotermního šnekového pyrolyzáru při zvyšování jeho průměru. Právě jeho složitost, provozní spolehlivost a s tím spojené požadavky na kvalitu paliva mohou být hlavní překážkou úspěšné komercializace celého konceptu Viking [17].



Obr. 3: Schéma vícestupňových generátorů pro zplyňování pevných paliv

2.3 Vícestupňové generátory s autotermní pyrolyzní jednotkou

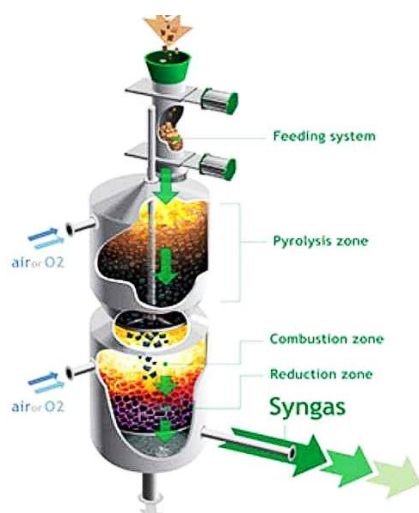
Jiným způsob ohřevu paliva v pyrolyzáru je realizován v generátorech s dvojitým ohněm (*twin-fire gasifier*) [15]. Teplo potřebné pro pyrolyzu je získáváno spalováním malé části paliva přímo v pyrolyzáru. Použitý způsob ohřevu zjednodušuje a zlevňuje celé zařízení, ale zároveň snižuje i účinnost výroby plynu (η_{ce}).

Schématická konstrukce generátoru vyvinutého Tomasem Kochem (TK Energi A/S) je uvedena na (Obr. 4b). Pyrolyza probíhá v šikmém pyrolyzáru pomocí tepla uvolňovaného spalováním paliva malým přídatkem primárního vzduchu. Uvolněná prchavá hořlavina je spalována větším množstvím sekundárního vzduchu v parciálně-oxidační komoře, poté horké spaliny vstupují do redukční zóny nad roštem. Uhlíkatý zbytek z pyrolyzáru spadá do redukčního lože, umístěného v dolní části vertikálního souprouděho generátoru. V roce 1998 byla postavena první demonstrační jednotka o elektrickém výkonu 50 kW (200kW_t) v Køge (DK). 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.

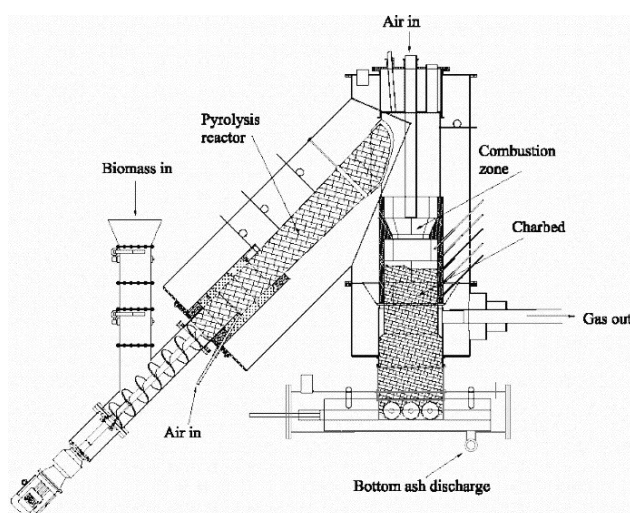
K podobnému typu zařízení patří také belgický generátor NoTar od firmy XyloWatt [4]. Generátor vznikl optimalizací a úpravami vlastního souprouděho sesuvného generátoru podobného generátoru „Imbert“ [8]. Do zúžené dolní části konstrukce se přivádí zplyňovací vzduch a vzniká oxidační pásmo, pod ním je umístěno pásmo redukční. U generátoru NoTar je realizováno přerušení souvislé vrstvy pyrolyzního uhlíkatého zbytku redukční zóny a je realizován další vstup oxidačního media, díky čemuž v generátoru vznikly tři oblasti (Obr. 4a). V horní části generátoru NoTar se nachází autotermní pyrolyzáru 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. Spalování prchavé hořlaviny v oxidační části NoTar generátoru umožňuje snížení obsahu dehtu na hodnotu pod 100 mg/m^3 . Společnost XyloWatt v současné době provozuje více než 5 průmyslových aplikací s tepelným výkonem 1 až 3 MW.[4][7]



a) NoTar generátor od firmy
XyloWatt [4][8]



b) generátor TK Energi A/S

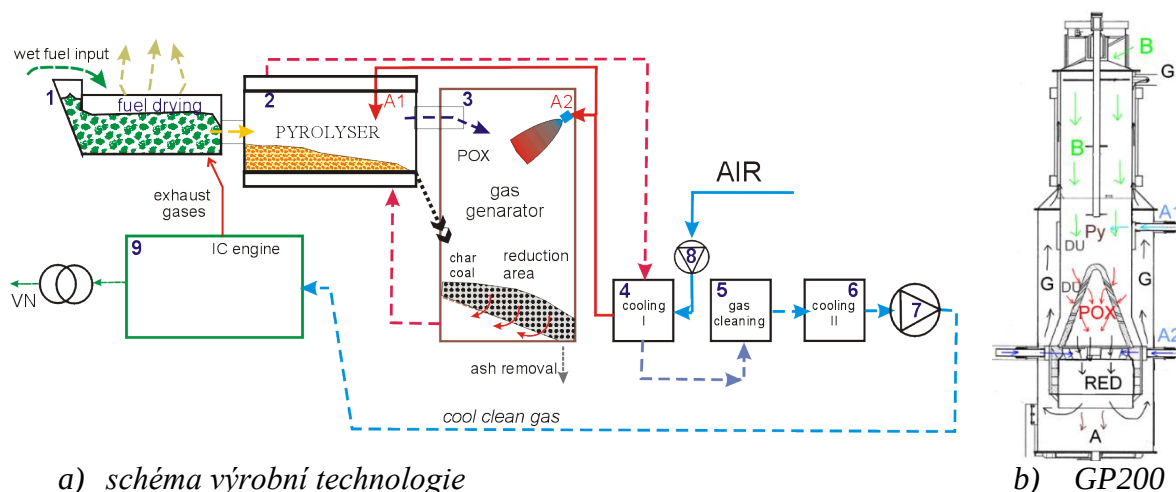
Obr. 4 Vícetupňové generátory s autotermní pyrolýzní jednotkou

3 Vícetupňové generátory v ČR

V roce 2010 firma TARPO spol. s r.o. vypracovala vlastní koncept vícetupňového zplyňování biomasy. Principiální schéma (Obr. 5a) a funkce vlastního generátoru zajišťujícího proces je poněkud odlišná od již diskutovaných typů generátorů a je schematicky znázorněno na Obr. 5b. 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 kužele (ve formě obráceného „V“) umístěného do vnitřního prostoru generátoru. Konstrukce kužele, jeho vlastnosti a materiál použitý pro výrobu patří k „know-how“ firmy TARPO spol. s r.o. V pyrolýzní části generátoru (Py) nastává ohřev předem vysušeného dřeva na teplotu 450°C až 550°C . Pro uvolnění prchavé hořlaviny v pyrolýzní části generátoru se používá jak tepla získaného oxidací části paliva primárním vzduchem (A1), tak i alotermního tepla prostupujícího keramickým kuželem (radiace, vedení) a vnější stěnou pyrolyzéru, okolo které proudí horký plyn vystupující z redukční zóny (RED). Uvolněná prchavá hořlavina je ihned odváděna do parciálně oxidační komory (POX) lokalizované přímo uvnitř kužele. V POX komoře nastává dokonalé mísení prchavé hořlaviny s přiváděným zplyňovacím vzduchem (A2) a její oxidace při teplotách nad 1200°C . Horké spaliny obsahující převážně plynné složky (hlavně H_2 , CO , CO_2 , H_2O) dále vstupují do kontaktu s redukčním uhlíkovým ložem (RED), kde se ochlazují endotermními zplyňovacími reakci na teplotu pod 700°C , prochází roštem a dále vstupují do pláště generátoru, kde předávají své teplo palivu v pyrolýzní části. Součástí celé linky je také sušárna na nízko potenciálové teplo, umožňující snížit vlhkost paliva vstupujícího do generátoru pod 5 %. 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]. Celková elektrická účinnost stávající elektrárny s použitím spalovacího motoru ČKD Hořovice (S160) se zvýšila z původních 25% na 27 %. Obsah dehtu v plynu za generátorem poklesl z cca 2000 mg/m³ pro GP300 na hodnotu pod 25 mg/m³ pro GP200. Díky poklesu obsahu dehtu z čistící linky plynu po několika měsících provozu byla odpojena i olejová pračka, jejíž čistící účinnost se za těchto podmínek ukázala jako málo efektivní.



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. 5 Vícestupňový generátor Tarpo GP200 [9]

Díky zkušenostem z provozu prototypového generátoru byla zahájena realizace řady projektů zaměřených na komercializaci vícestupňového generátoru. Stručný výčet 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. 6 [11][12].

Tab. 1. Přehled vícestupňových generátorů využívajících design TARPO

Lokalita	Zahájení provozu. Typ generátoru	Způsob čištění plynu	Typ motoru	Projekční elektrický výkon/účinnost
1. Kněžves (CZ)	2012, GP200	Keramické filtry (450-500°C)	ČKD, 2x6S160, 27l, R6	200 kW/27 %
2. Odry (CZ)	2012/2013, 2xGP500	Keramické filtry (500-550°C)	Jenbacher 2xJ316, 48l, V16	2x500 kW/32 %
3. Olešnice (CZ)	2013/2014, GP200XL	Rukávové filtry (100-110°C)	ČKD, 2x6S160, 27l, R6	200 kW/27 %
4. Handlová (SK)	2014/2015, 2xGP750	Keramické/rukávové filtry (120/500°C)	Guascor FBLD560, 56l Guascor FBLD480, 48l	570+430 kW/32%
5. Dobříš (CZ)	2015, 1xGP750	Rukávové filtry (110-160°C)	Guascor, FBLD560, (56l),	650 kW/32%
6. Kozomín (CZ)	2014/2015, 5xGP750	Keramické filtry (550-650°C)	Jenbacher, 3xJ320, (60l, V20)	3x710kW/32% 5,1 MWt



V roce 2011 byla zahájena příprava prvního komerčního projektu v Odrách využívajícího dvoustupňového generátoru TARPO o elektrickém výkonu 500 kW (GP500). Jedná se o zvětšenou a upravenou variantu generátoru GP200. Elektrárna má dvě výrobní linky o elektrickém výkonu 500 kW každá, obě linky používají pro spalování plynu moderní plynové motory Jenbacher J316 ($\eta=36\%$). Za sušárnou štěpky společnou pro obě linky je umístěna třídící jednotka. Pro zplyňování se používá štěpka o velikosti 5 až 60 mm. Štěpka se dopravuje pasovými podavači samostatně do dvou nezávislých zpracovatelských linek. Horký plyn z generátoru GP500 vstupuje do keramických svíčkových filtrů, potom je veden do výměníku na ohřev zplyňovacího vzduchu, dále do kontaktního chlazení vodou, přehřevu a mix tanku. Z mix tanku plyn vstupuje do spalovacího motoru. Zkušební provoz první linky generátoru byl zahájen na konci roku 2012. Výsledky složení plynu a obsahu dehtu plynu byly srovnatelné s výsledky získanými z generátoru GP200 (viz Tab. 3). Do stálého provozu elektrárna byla zapojena na začátku roku 2014. Zkušební provoz ukázal, že generátor je sice schopný zpracovat paliva i s vysokým obsahem jemných frakcí (20 hm. % vel. < 2 mm) a popelovin (cca 10 hm. %), ale tyto paliva způsobují dlouhodobé zvýšení provozní tlakové ztráty generátoru, snižují výkon a stabilitu jeho provozu. Jako minimální velikost třídícího síta nakonec byla použita oka o velikosti 5 mm, přípustný obsah menších částic byl limitován na max. 5 hm. %. Během zkušebního provozu byly také odzkoušeny i různé možnosti studených startů generátoru a jeho ohřevu na provozní parametry.

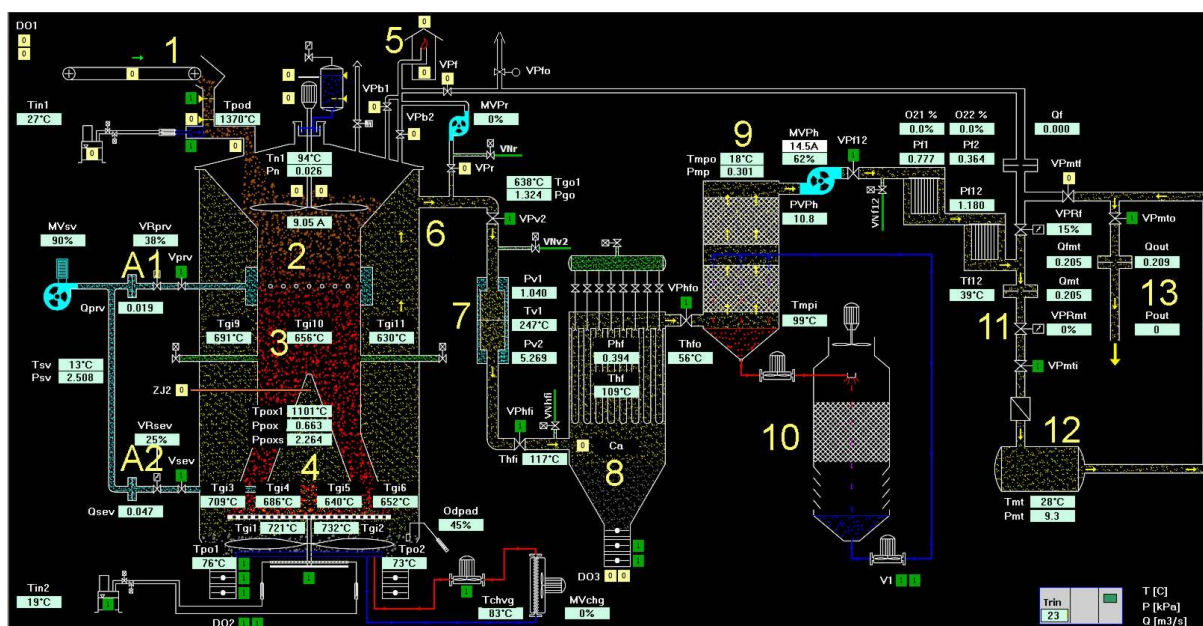


Obr. 6 Lokalizace jednotlivých zařízení využívajících vícestupňové generátory v ČR

Nejvýkonnějším a zároveň největším je generátor GP750 schopný produkce skoro 1200 m³/h plynu (0°C, 101,325 kPa) dostačující pro provoz spalovacích motorů s elektrickým výkonem 750 kW. Zařízení pracuje na stejném principu jako generátor GP200 a GP500, ale kvůli zvýšené velikosti se poněkud odlišuje konstrukcí pyrolýzní části, POX komory a tvaru a velikosti redukčního lože. Celkem bylo postaveno 8 generátorů GP750, pět je umístěných v Kozumíně, dva generátory GP750 jsou v Haldově a jeden v CAV Dobříš. Typické schéma technologické linky je uvedeno na Obr. 7. Podle konkrétní instalace se jednotlivé technologie mohou lišit způsobem odstraňování TZL z plynu a použitým typem spalovacího motoru. K nejdéle provozovaným generátorům patří dvě nezávislé linky umístěné v Handlové (viz. Obr. 7). Dodavatel technologie ve snaze snížit instalační náklady použil pro tuto výkonnostní řadu látkové rukávové filtry s injekcí ochranné vrstvy (max. tep. 140°C) na místo keramických (tep. 550–650°C) u méně výkonných verzí. Odstranění filtračního koláče se provádí aplikací tlakového rázu dusíkem. Při zkušebním provozu s častými starty a odstávkami se ukázalo, že generátor a filtrační zařízení pracuje spolehlivě a stabilně. Bohužel v některých neočekávaných okamžicích (start, snížení výkonu generátoru) mohou nastat zvláštní provozní situace, kdy obsah dehtu v plynu krátkodobě mnohonásobně stoupá. U použitého systému chlazení a odstraňování TZL v těchto okamžicích bylo pozorováno i razantní zvýšení tlakové ztráty výměníku (7, viz Obr. 7) lepivými prachovými částicemi. V extrémním případě nastávalo jejich



značné zalepování, které vyžadovalo odstávku linky a fyzické čištění výměníku. V jednom extrémním případě bylo zaznamenáno i zalepení částí filtračních elementů lepivým koláčem, po kterém bylo nutno také provést jejich výměnu. Příčina uvedeného chování generátoru tehdy nebyla jednoznačně určena. Pro zvýšení odolnosti celého zařízení proti občasnému zvýšení obsahu dehtu se na některých generátorech dodavatel vrátil k původní koncepci čištění plynu a provedl náhradu nízkoteplotních filtračních elementů vysokoteplotními s následujícím chlazením plynu. Uvedené opatření tak zvýšilo odolnost celého systému proti nežádoucím výkyvům a umožnilo zamezit nežádoucímu zanášení výměníku a tak i odstávce celého systému. Použité vodní pračky byly schopny zachytit zvýšené množství dehtu v plynu, aniž by to záporně ovlivnilo provoz motoru.



1- vstup paliva do GP750, 2-dosušovací část, 3- pyrolýzní část, 4- parciálně-oxidační část, 5-spalovací flétra, 6-odvod plynu z generátoru 7- vodní chladič plynu, 8- rukávové látkové filtry, 9- kontaktní chlazení plynu, 10- kontaktní chlazení plynu v chladičí věže, 11-měřicí clona, 12-mix tank, 13-meřicí clona před motorem

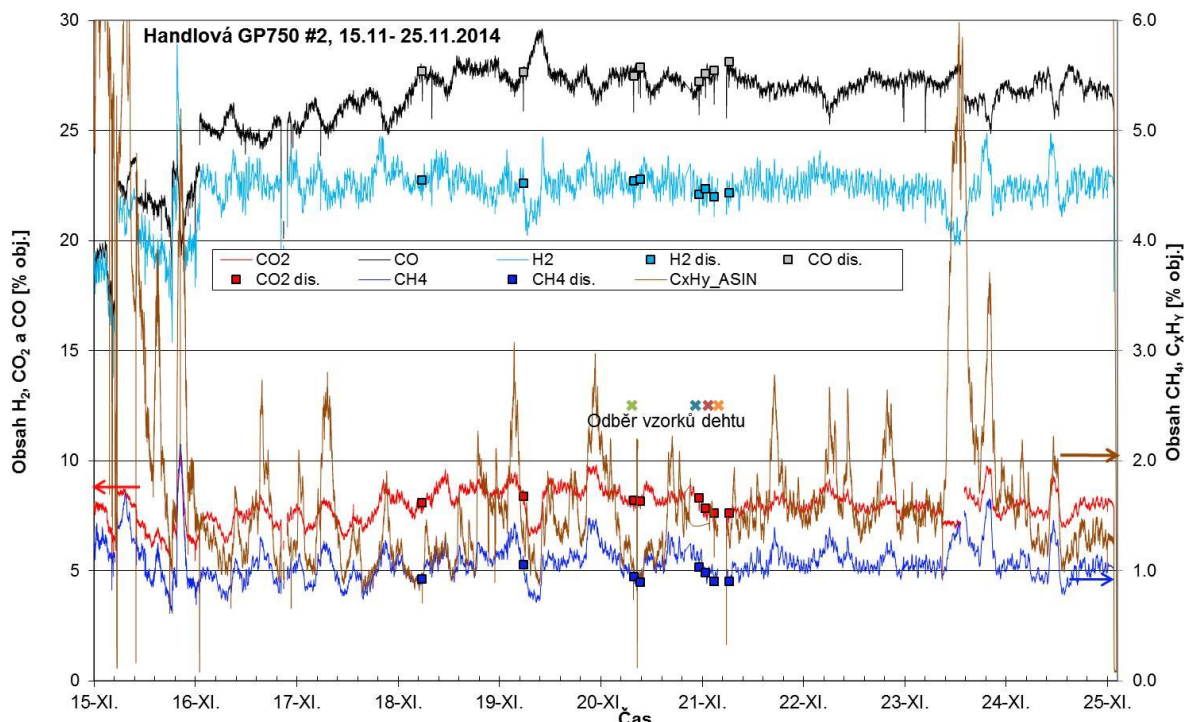
A1-přívod primárního vzduchu A2- přívod sekundárního vzduchu

Obr. 7. Technologické schéma kogenerační jednotky G750 (CAV Dobříš)

Měření složení plynu a obsahu dehtu provedené pracovníky VŠCHT Praha a ÚCHP AV ČR pomohla zjistit řadu příčin zvyšování obsahu dehtu v plynu z generátoru. Pozorovaný problém byl způsoben hlavně zvýšením velikosti generátoru, což při sníženém výkonu způsobovalo změny charakteru proudění plynu uvnitř pyrolýzní části generátoru (3) a v POX komoře generátoru (4). K tomuto faktu také značně přispěl i způsob regulace přívodu primárního (A1) a sekundárního vzduchu (A2). Také se ukázalo, že hodnota teploty v POX komoře má vliv na složení plynu, ale v menší míře na obsah a složení dehtu. Hlavním faktorem ovlivňujícím obsah dehtu v plynu je hydrodynamika proudění v POX komoře ovlivněná poměrem a průtokem primárního a sekundárního vzduchu. Dalším zdrojem problémů bylo příliš časté roštování způsobující vynášení uhlíkatého nedopalu z generátoru a posunu pyrolýzní zóny příliš blízko k vstupu do POX komory. K podobnému efektu také může vést i použití paliva s vlhkostí vyšší než 20 hm. % (situace typická pro výpadky sušárny). Uvedené problémy byly postupně eliminovány a byl implementován nový způsob řízení a regulace přívodu primárního (A1) a sekundárního (A2) vzduchu do generátoru. Také byl zjištěn i vliv základních parametřů paliva (tvar, velikost frakce, vlhkost) ovlivňující kvalitu produkovaného plynu a stabilitu provozu.



Záznam obsahu hlavních složek plynu produkovaného generátorem G750 č.2 v elektrárně Handlová je uvedeno na Obr. 8. Do záznamu jsou také uvedeny výsledky stanovení plyných vzorků odebraných do plynotěsných vzorkovnic. Studený start generátoru byl zahájen odpoledne 12. listopadu 2014. 15. listopadu 2014 byl plyn použit pro pohon motoru (počátek záznamu), v tomto okamžiku začala fungovat sušárna paliva a vlhkost dřeva se snížila na hodnotu pod 10 hm.%. Ze záznamu je vidět, jak během prvních dvou dnů (z 15. do 17. listopadu) se měnilo složení plynu v důsledku ohřevu celého generátoru a vstupu sušího paliva do generátoru. Obsah metanu, uhlovodíků, CO_2 a N_2 klesal, obsah CO a H_2 stoupal. Od 17. listopadu generátor pracoval v ustáleném stavu. 21. a 22. listopadu se také prováděl odběr vzorků dehtu, časy odběrů jsou uvedeny na záznamu, jehož obsah dle metodiky Tar Protokolu se pohyboval od 30 do 100 mg/m^3 . Zajímavou informací o čistotě plynu poskytuje srovnání obsahu metanu (CH_4) z analyzátorů ABB a obsahu metanu a dalších uhlovodíků ($\text{C}_x\text{H}_y_ASIN$) naměřených analyzátelem ASIN AIR. V případě, kdy se tyto hodnoty shodovaly, obsahoval plyn minimální množství dehtu. Poměr mezi uvedenými hodnotami ($\text{C}_x\text{H}_y_ASIN/\text{CH}_4$) byl vyšší než 4 a postupně klesal na hodnotu v intervalu od 1 do 2, která odpovídá přijatelnému obsahu dehtu. Na záznamu jsou však také vidět i časové intervaly (např. 19:30 23. 11. 2014–2:00 24. 11. 2014), kdy tento poměr narůstá nad hodnotu 4. Tento interval je charakteristický pro produkci plynu s vyšším obsahem dehtu. Jako palivo byla použita štěpka (viz Tab. 2). Vlhkost štěpky na vstupu do generátoru se měnila v rozmezí 5–16 hm. %. Linka č. 2 byla provozována s rukávovými filtry bez odstávky až do lednu 2015. Přes jisté problémy se zvýšenou tlakovou ztrátou na výměníku (7) nebyly během tyto doby zaznamenány větší problémy s provozem rukávových filtrů. Po odstávce byla provedena úprava stávajícího systému na použití horkých filtrů ($550\text{--}650^\circ\text{C}$).

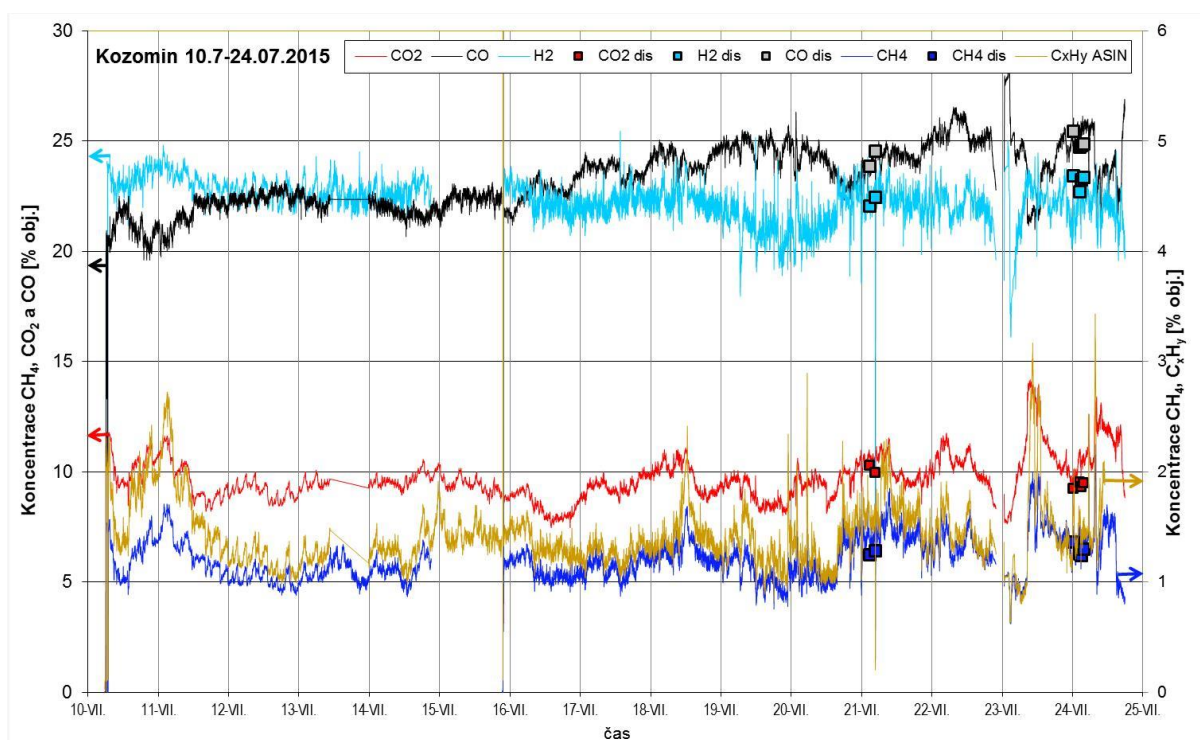


Obr. 8. Záznam vybraných složek plynu na výstupu z generátoru GP750 z generátoru G2 v Handlové



Závěrem lze uvést, že chlazení surového plynu na teplotu 120–150°C a jeho následná filtrace na rukávových filtrech je akceptovatelné pro odstranění TZL z plynu. Současně s TZL jsou také odstraněny zachycené výše vroucí podíly dehtu. Pro jejich správnou funkci je však nutno respektovat řadu provozních parametrů (správná teplota filtru a způsob jeho provozu). Potvrzením toho je dlouhodobý provoz rukávových filtru na jednotce v Handlové, CAV Dobříš, kde je od června 2015 ve stálém provozu generátor GP750.

Největším provozovatelem víceetapňových generátorů GP750 na území ČR je společnost BOR Biotechnology a.s. (dále Kozomín) provozující technologii pro zpracování biomasy, odpadního dřeva a ostatních dřevních hmot pro peletizaci. Kozomín se skládá s pěti výrobních linek uvedených na Obr. 7. Vyčištěný a ochlazený plyn ze všech 5 jednotek je sveden do jednoho mix tanku, ze kterého vystupuje plyn pro napájení 3 motorů Jenbacher J320 o elektrickém výkonu 710 kW a jednoho parního generátoru pro výrobu technologické páry pro provoz papírenských strojů. V současné době jsou provozovány všechny tři spalovací motory. Technologická část papírny není zatím postavena a parní generátor není v provozu. Dnes jsou současně provozovány 3 generátory GP750 a plyn je spalován ve třech spalovacích motorech. Odstraňování TZL probíhá na horkých filtrech (550–650°C), za nimi je zařazeno chlazení a dočišťování plynu, který ze všech používaných linek vstupuje do společného mix tanku.



Obr. 9. Záznam vybraných složek plynu na výstupu z mix tanku jednotky v Kozomíně



Tab. 2. Vlastnosti vybraných druhů štěpky



Vlastnost	Veličina	štěpka Kozomín	štěpka Handlová
vlhkost, W^a	% hm.	14,01	5,00
prchavá hořlavina, V^{daf}	% hm.	81,05	85,68
fixní uhlík, F^{daf}	% hm.	18,95	14,32
popel, A^d	% hm.	2,78	1,08
C	% hm.	50,28	49,58
H	% hm.	6,15	6,30
O	% hm.	40,12	42,43
N	% hm.	0,27	0,50
S	% hm.	0,04	0,02
spalné teplo, Q_s^*	MJ.kg ⁻¹	16,22	18,68
spalné teplo, Q_s^{daf}	MJ.kg ⁻¹	19,41	19,55

* - hodnota původního analytického vzorku dřeva

Záznam časového průběhu vybraných složek plynu z mix tanku na zařízení umístěného v Kozomíně je uveden na Obr. 9. Při pořízení záznamu byly v provozu tři generátory, takže záznam odpovídá směsnému plynu, který byl spalován ve třech motorech. Jak je vidět, složení plynu je stabilní, občas na záznamu jsou patrné určité výkyvy, způsobené změnou výkonu jednotlivých generátorů a motoru. Při srovnání záznamu s výsledky z Handlové (viz Obr. 8.) je patrné, že plyn obsahoval poněkud více metanu, oxidu uhličitého a dusíku. Obsah oxidu uhelnatého byl o něco nižší. Obsah vodíky v plynu byl skoro stejný. Uvedené chování bylo způsobeno použitím trochu jiného paliva (viz Tab. 2) s vyšší průměrnou vlhkostí, která se pohybovala od 8 do 18 hm. %.

3.1 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. 3. Pro srovnání je v tabulce také uvedeno složení plynu ze souproutého vrstevnatého generátoru (GP300) [14] a souproutého generátoru typu Imbert o elektrickém výkonu 100kW [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 ze složení plynu provést přibližné srovnání účinností výroby plynu (η_{ce}). Obsah N_2 v plynu je přímo úměrný množství vzduchu použitého pro výrobu plynu. Účinnější výroba plynu bude v tom případě, kdy se spotřebuje méně vzduchu a vyrobený plyn tak obsahuje méně N_2 . Nejmenší množství N_2 je v plynu produkovaném generátorem Viking, který využívá odpadní teplo spalin z motoru a tak má největší účinnost výroby plynu ($\eta_{ce}=95$ %). Nízký obsah dusíku v plynu je také způsoben vysokou vlhkostí paliva, navyšující celkovou produkci plynu (H_2 , CO_2). Lze předpokládat, že pro štěpku obsahující pod 10 hm. % vlhkosti se obsah dusíku v plynu zvýší na



hodnotu okolo cca 37 obj. %. Nejnižší účinnost má dvoustupňový generátor od firmy XyloWatt a to v důsledku zvolené konstrukci generátoru, kdy jeho účinnost je srovnatelná s účinností souproutého generátoru od společnosti TARPO spol. s r.o. GP300 (dnes již nepoužívaného), který produkuje plyn o podobném složení. Bohužel se nepovedlo získat informace o složení plynu produkovaného třístupňovým generátorem od firmy TK Energi A/B. Po shrnutí dostupných informací lze konstatovat, že vícestupňové generátory GP200, GP500 a GP750 vykazují díky kombinovanému způsobu pyrolýzy vyšší účinnost výroby plynu, než diskutované zařízení, vyjma generátoru Viking.

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 se ukázalo, důležitým ukazatelem kvality plynu je také poměr obsahu všech uhlovodíků (signál z neselektivního analyzátoru CH_4) k metanu ($\text{C}_x\text{H}_y_ASIN/\text{CH}_4$). V případě poměru pod 2 lze předpokládat, že obsah dehtu v plynu je nízký. Při poměru větším než 3 jsou v produkovaném plynu přítomny primární a sekundární složky dehtu, což ukazuje na určité problémy s provozem generátoru.

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.

Tab. 3 Srovnání složení plynu z různých vícestupňových generátorů

Typ zařízení		Imbert1		XyloWatt NoTar		DTU	TARPO spol s.r.o.			
Parametr		dřevo	DU	vzduch	O2	Viking	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	27,6
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	1,1
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 modifikovaný generátor „Imbert“ od firmy BossEngineering v obci Louka provozovaný na dřevěné uhlí [2].

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

4 Závěr

Všeobecně lze konstatovat, že nejmenší výkonnostní řady vícestupňových generátorů 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 Kozomině ukázala, že složení plynu a obsah dehtu značně závisí na způsobu provozu generátoru, vlastnostech paliva



a poměru primárního (A1) a sekundárního (A2) vzduchu. Při nevhodných režimech může nastat průnik prchavé hořlaviny skrz 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 zejména na výkonu generátoru, vlhkosti paliva vstupujícího do generátoru (do 10 hm. %) a přiměřené intenzitě roštování.

Vícestupňové generátory GP200, GP500 a GP750 jsou důležitým milníkem ve vývoji lokálních zařízení pro efektivní zplyňování biopaliv. Oproti známým souproudým 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 uvolnění prchavé hořlaviny. Nejefektivnější a zároveň i nejsložitější je vícestupňový generátor Viking, využívající externího šnekového pyrolyzéry otápeného spaliny z motoru. Existují i jiné typy reaktorů využívající malé množství vzduchu pro oxidaci části paliva přímo v pyrolýzeru (NoTar, TK Energy), nebo zařízení kombinující oba uvedené způsoby pyrolýzy (GP200, GP500, GP750). Jejich účinnost bývá o něco nižší než v případě generátoru Viking, ale vyšší než u většiny dnes používaných zařízení.

V současné době je v ČR realizováno několik projektů zaměřených na provoz vícestupňových generátorů, momentálně probíhají práce zaměřené na optimalizaci provozu největšího z nich – generátoru GP750. Dosavadní zkušenosti s jeho provozem ukazují na to, že generátor je schopný produkovat plyn výborné kvality s nízkým obsahem dehtu. Zároveň se také ukazuje, že existuje více parametrů ovlivňujících složení a kvalitu produkovaného plynu, než se původně předpokládalo. 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 několikaměsíčního provozu lze charakterizovat jako velice uspokojivé a nadějně.

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.xylo watt.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] Pícek 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 Biomass Energy Foundation Press, 1998.
- [11] Skoblia S., Pícek 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., Pícek 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 Processes for Fuel Conversion, Gas Cleaning and CO₂ Separation in FB and EF Gasification of Coal, Biomass and Waste, Prague (CZ), 2013-06-12 / 2013-06-14.
- [13] Skoblia S., Pícek 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., Pícek 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.