

VÝVOJ MALÝCH A STŘEDNÍCH KOGENERAČNÍCH JEDNOTEK NA BIOMASU A JEJICH APLIKACE V PRAXI

Skoblia Siarhei^a, Pícek Ivo^b, Beňo Zdeněk^a, Pohořelý Michael^{c,d}

^a Ústav plynárenství, koksochemie a ochrany ovzduší, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Technická 5, 166 28 Praha 6

^b TARPO s.r.o., Pražská 346, Kněžves 270 01

^c Ústav chemických procesů AV ČR, v.v.i., Rozvojová 135, 165 02 Praha 6

^d Ústav energetiky, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Technická 5, 166 28 Praha 6

e-mail: skoblijas@vscht.cz, tarpo@tarpo.cz

The article reports the experience with long-term operation of a cogeneration unit of 100 kW_e. Wood chips are dried in integrated dryer and used as a fuel for downdraft gasifier. Raw gas with an average LHV of 6.0 MJ/m³ contains a small amount of dust solid particles (<500 mg/m³) and tar (<2000 mg/m³). Impurities are removed by a hot filter (dust) operated in range 390-500°C and scrubber (tar) with an organic medium operating in a closed cycle. The electrical efficiency is about 24 %, total is about 75 %. The CHP operates since 2009 and has logged more than 15,000 hours of operation.

Klíčová slova: zplyňování biomasy v souproudečném generátoru, účinnost výroby elektrické energie, ověření technologie odstraňování dehtu a TZL z plynu, dlouhodobé zkušenosti s provozem elektrárny

ÚVOD

„Biomasa“ je jedním z nejdostupnějších a nejrozšířenějších obnovitelných zdrojů energie (OZE). Tento zdroj má v podmínkách České republiky jak největší potenciál, tak i obrovskou perspektivu praktického využití. Problematika energetického využití „biomasy“ pro kombinovanou výrobu elektrické energie a tepla (KVET) je v dnešní době závislá na dvou klíčových faktorech. *Prvním faktorem* je dostupnost vhodné technologie umožňující efektivní transformaci energie biomasy na elektrickou a tepelnou energii. *Druhým faktorem* je celková ekonomická návratnost technologického procesu. Vzhledem k nízké plošné hustotě zdrojů biomasy (zásadní odlišnost oproti fosilním palivům) je elektrická energie vyrobená na současných konvenčních spalovacích zařízeních za takto nastavených podmínek vždy dražší, než energie vyrobená stejnou technologií ale z fosilních paliv. Dotační politika státu podporující výrobu elektrické energie z biomasy prostřednictvím zvýhodněných výkupních cen elektřiny a systému „zelených bonusů“ používaných při vlastní spotřebě elektřiny, kompenzuje vyšší náklady spojené s použitím dražší biomasy. Státní podpora zatím nebyla vázána na použití nejlepší dostupné techniky (BAT), a tak je podporováno i spoluspalování biomasy s uhlím na starších energetických zařízeních s nízkou elektrickou účinností (< 28 %). Hlavním důvodem zavedení „celoplošné“ podpory výroby elektrické energie z OZE bylo naplnění závazků ČR vůči EU v dosažení deklarovaného podílu ve výrobě elektrické energie z OZE. Právě díky využití stávajících elektrárenských kapacit byly tyto závazky úspěšně splněny (8 % podíl v roce 2010), a to za cenu minimálních investic do stávajících technologií. Uvedená dotační politika také příznivě přispěla ke vzniku nových čistě „zelených“ zdrojů, využívajících konvenčních spalovacích technologií a parní turbíny. Příkladem může být stavba největšího elektrárenského bloku tohoto typu v ČR (Zeleného kotle) Plzeňskou Teplárenskou společností o elektrickém výkonu 11 MW (celková elektrická účinnost $\eta_{ce}=27,6\%$)[2]. Zapojení do sítě proběhlo už v roce 2010 a roční spotřeba biomasy dosahuje až 115 000 tun, a tak nahrazuje spotřebu cca 80 000 tun uhlí ročně. Už od zahájení provozu se ukázaly problémy s dostupností vhodné biomasy v okolí zdroje. Proto kromě lesní hmoty a odpadů z pil a rychle rostoucích plodin, byly také do palivového mixu kotle zařazeny i další typy paliv jako například mláto (vedlejší produkt z výroby piva). Pivovar Prazdroj, umístěný v blízkosti „Zeleného kotle“ produkuje ročně až 80 000 tun odpadního mláta, ze kterého je polovinu možno použít pro energetické účely.

Vzhledem k umístění „Zeleného kotle“ v blízkosti pivovaru není nutno uvedené množství vlhkého mláta (vlhkost až 80 % hm.) přepravovat na velké vzdálenosti, což značně snižuje dopravní náklady a zatížení okolního prostředí dopravou[4]. Před spalováním je nutné mláto odvodnit (vlhkost cca 50 % hm.) a posléze vysušit v elektrárenské sušárně, díky čemuž spalné teplo takto upraveného materiálu se dosáhne velice dobrých hodnot ($Q_s^d = 22 \text{ MJ/kg}$). [5]

Jak je vidět hromadné spalování a hlavně spoluspalování biomasy ve velkých elektrárenských kotlích často způsobuje její lokální nedostatek, zvyšující dopravní vzdálenosti a v důsledku toho i nárůst ceny biomasy na trhu. Nadměrná doprava biomasy bohužel eliminuje hlavní výhodu tohoto zdroje OZE: celkovou neutrální bilanci emisí oxidu uhličitého. Dovoz z větší vzdálenosti se dá akceptovat pouze v případě biomasy ve formě kvalitních biopaliv, kde měrné emise oxidu uhličitého na jednotku dovezené energie vztažené na kilometr jsou minimální, jak tomu je v případě dřevních pelet, pyrolýzních olejů, případně produktů torefakce. Dopravu čerstvě vytěžené lesní hmoty o vlhkosti vyšší než 50 % obsahující značné množství stržených anorganických podílů vzhledem k její nízké sypné hmotnosti (max. 400 kg/m^3), vysokému obsahu vlhkosti, a tak i nízké hodnotě spalného tepla ($< 6\text{--}8 \text{ MJ/kg}$) lze realizovat jen na velice krátké svozové vzdálenosti.

PERSPEKTIVY VYUŽITÍ ENERGIE BIOMASY A JEJÍ TRANSFORMACE

V dlouhodobém horizontu lze s jistotou očekávat, že v důsledku širšího energetického využití dostupných zdrojů biomasy její ceny i nadále porostou. Na druhou stranu, s postupným zvyšováním podílu obnovitelných zdrojů ve výrobě elektrické energie finanční dotace na její výrobu budou klesat. Za těchto podmínek se na trhu budou schopny ekonomicky udržet pouze kogenerační jednotky vyrábějící elektrickou energii s vyšší účinností (η_{ce}) a efektivním využitím odpadního tepla. Díky specifickému charakteru zdrojů biomasy a jejich nízké plošné hustotě, efektivního energetického využití biomasy ve většině aplikací zaměřených na lokální zdroje lze dosáhnout pouze u menších energetických jednotek ($0,2$ až 2 MW_e) decentralizovaného typu zajištěných dostatkem vlastních zdrojů biomasy. Výhodou decentralizovaných energetických zdrojů je také snadnější celoroční využití tepla (případně chladu) pro technologické a komunální účely přímo uvnitř infrastruktury objektu zdroje nebo podniku. Použití konvenčních technologií využívajících přímého spalování a expanze páry v kondenzační turbíně o výkonu 1 až 4 MW_e vede ke značné redukci elektrické účinnosti celého systému ($< 20 \%$), ale hlavně ke značnému nárůstu měrných investičních nákladů na jednotku instalovaného výkonu.

Dlouhodobé zkušenosti ukazují, že výhodnější alternativou k přímému spalování biomasy v kotlích klasických elektráren je termochemická transformace energie do formy hořlavých plynů následně spalovaných v plynovém motorgenerátoru. Pyrolýza nebo zplyňování používané pro transformaci energie mají všeobecně svoje výhody a nedostatky, které se dají využít při zpracování odlišných biomateriálů a použití různých koncových technologií pro výrobu elektrické energie. Zplyňování je termochemickou přeměnou pevného organického materiálu na plyné palivo přímým působením zplyňovacích medií za vysokých teplot. Zplyňovacím médiem může být O_2 , H_2O , vzduch, CO_2 nebo případně jejich směs. Na složení použitého zplyňovacího media je také závislé tepelné zabarvení celého procesu a v kombinaci s použitým typem generátoru i složení a kvalita produkovaného plynu¹⁸. Pyrolýza probíhá bez kontaktu ze zplyňovacím médiem a proto vždy vyžaduje přísun tepelné energie. Produktem procesu jsou tři hlavní složky: pevný uhlíkatý zbytek, kapalný podíl a hořlavý plyn. Složení a distribuce hlavních produktů v obou případech závisí na použitém typu reaktoru/generátoru a provozní teplotě. Výhodou zplyňování je oproti pyrolýze tvorba převážně hořlavého plynu, který obsahuje kromě žádoucích složek (H_2 , CO , CH_4) rovněž složky nehořlavé CO_2 , N_2 , vyšší uhlovodíky, dehet a další nežádoucí látky (TZL, sloučeniny síry, chloru).

Elektrická účinnost výsledného kogeneračního systému (η_{ce}) je součinitelem účinnosti výroby plyného paliva (η_{pl})¹ a hodnotou účinnosti výroby elektrické energie v kogenerační jednotce (η_{kj}):

$$\eta_{ce} = \eta_{pl} \cdot \eta_{kj} \quad (1)$$

¹ Účinnost výroby studeného plynu (cold gas efficiency) je definována poměrem chemické energie plynu na výstupu z generátoru k energii původního paliva na vstupu do generátoru vypočteném za referenčních podmínek (0°C , $101,325 \text{ Pa}$)

Díky tomu kombinace motorgenerátoru (účinnost $\eta_{kj}=38\%$) se zplyňovacím generátorem (účinnost výroby studeného plynu $\eta_{pl}=65\%$) umožňuje dosažení až 25 % celkové účinnosti (η_{ce}) výroby elektrické energie. Při použití spalovací expanzní turbíny pro spalování plynu bude elektrická účinnost celého procesu nižší ($\eta_{ce} < 21\%$), a to v důsledku nižší účinnosti samotné spalovací turbíny. [6] Naopak při zvýšení celkové účinnosti výroby plynného paliva (η_{pl}), například díky použití efektivnější termokonverzní technologie, lze „elektrickou“ účinnost celého kogeneračního systému (η_{ce}) zvýšit na hodnotu okolo 35 %². Takto vysokých hodnot účinnosti lze dosáhnout na rozdíl od parních turbin už u malých kogeneračních jednotek a to od výkonu od 100 kW_e. [7] Celkové investiční náklady vztažené na jednotkový výkon zařízení budou z pochopitelných důvodů o něco vyšší než náklady velkých elektrárenských zdrojů. Skutečná hodnota bude značně záviset na použité technologii zplyňování, kvalitě produkovaného plynu a hlavně způsobu čištění produkovaného plynu od nežádoucích složek před jeho využitím v motoru.

KOGENERAČNÍ JEDNOTKY VYUŽÍVAJÍCÍ ZPLYŇOVÁNÍ BIOMASY LOKALIZOVANÉ V ČR

Fakta shrnutá v úvodní části článku patří k hlavním důvodům obrovského zájmu o praktickou realizaci podobných komerčních zařízení nejen ve světě, ale také v ČR, kde je dnes provozováno určité množství podobných technologií. Vybrané malé kogenerační jednotky lokalizované v ČR jsou uvedeny v Tab. 1. Zkušenosti z jejich provozem ukázaly, že rozhodující vliv na úspěšnou komerční realizaci má hlavně stabilita provozu generátoru a kvalita produkovaného plynu, která úzce souvisí s typem generátoru a podmínkách jeho provozu. Pro bezproblémový chod spalovacího motoru je nutno vyrobit spalitelný plyn o vhodném složení a zároveň zajistit nízký obsah nežádoucích složek přítomných v plynu, a to na úrovni akceptovatelné pro jeho bezproblémový provoz. K nežádoucím složkám v plynu pro spalování v motoru patří dehet (vyševroucí uhlovodíky)³ a tuhé znečišťující látky (TZL).

Zdrojem hořlavých plynů většiny jednotek uvedených v Tab. 1 je souproudý generátor typu Imbert, nebo jeho konstrukčně upravené verze, zaměřené hlavně na zlepšení stability provozu a rozšíření škály akceptovatelných paliv [11],[14]. Nespornou výhodou souproudých generátorů je produkce plynu s nízkým obsahem TZL a dehtu, což je ovšem často podmíněno použitím kusového dřeva vysušeného na vlhkost pod 10 až 15 % hm.. Použití jemnějšího paliva (pilin) nebo dřeva o vlhkosti větší než 20 % hm. zpravidla vede ke snížení stability provozu generátoru, účinnosti výroby studeného plynu a bohužel skoro vždy způsobuje zvýšení obsahu dehtu v plynu.

Tab. 1. Vybrané kogenerační jednotky v ČR používající pro výrobu hořlavého plynu zplyňovací generátor

Lokalizace jednotky/firma	Instalovaný výkon, kW _e	Typ generátoru	Způsob čištění plynu	Druh paliva
Planá nad Lužnicí	100	Imbert	vodní pračka	dřevní špalíčky
Lukavice/ Rendl	100	Imbert	horká filtrace, vodní pračka	dřevní špalíčky
Újezdeček /DSK	100-250	Imbert, souproud	vodní pračka	dřevo, dřevotříska
Louka/ BOSS	100	modifikovaný Imbert	suchá filtrace, vodní pračka	dřevní štěpka, špalíčky
Staré město/ BOSS	150	modifikovaný Imbert	vodní pračka	dřevní štěpka
Rakovník/TARPO do r.2011	200	souproudý, GP300	horká filtrace, olejová pračka	dřevní štěpka
Rakovník/TARPO od r.2012	200	vícestupňový	horká filtrace, olejová pračka	dřevní štěpka

Kladné a záporné zkušenosti z provozem zařízení uvedených v Tab. 1 poukázaly na řadu důležitých konstrukčních a provozních záležitostí, které provozovatelé podobných technologií musí bezpodmínečně respektovat. Přijatelnou stabilitu provozu generátoru je nutno zajistit použitím paliva o vhodné distribuci velikosti

² Úspěšným příkladem použití efektivnější termokonverzní technologie je provoz dvoustupňového zplyňovacího generátoru Viking o tepelném výkonu 75kW (30 kW_e), kdy účinnost výroby plynu dosahuje hodnoty více než 90 %.[7] Technický koncept dvoustupňového generátoru Viking znemožňuje navýšení provozního výkonu zařízení. Existují i jiné typy generátorů, umožňující dosažení podobných hodnot účinnosti výroby plynu, a to za vyšších výkonů, bohužel míra jejich realizace v komerční praxi ve světě je nízká.

³ Podle všeobecně přijímané evropské směrnice zvané pod akronymem Tar protocol (tar guideline) se do skupiny dehtu řadí všechny uhlovodíky s bodem varu vyšším než benzen[12], [13].

částic. Zkušenosti ukázaly, že přítomnost většího podílu příliš jemných částic (pod 5 mm) v palivu souprůdných generátorů Imbert vede zpravidla ke zhoršení stability provozu generátoru a nárůstu obsahu TZL a dehtu v plynu. Zvýšený obsah vlhkosti v palivu snižuje účinnost výroby plynu (η_{pl}), způsobuje pokles jeho teploty v žárovém (hrdlovém) pásmu, v důsledku čehož také narůstá obsah dehtu v plynu za ním. Zvýšení obsahu vlhkosti paliva nad 20 % hm. je další příčinou v praxi pozorovaného samovolného zhoršení kvality plynu a zvýšení obsahu dehtu v něm.

Z analýzy stavu a úspěšností dosud realizovaných projektů (viz Tab. 1) také vyplývá nutnost použití sušárny pro předsušování surového vlhkého paliva nejlépe s využitím nízkopotenciálního tepla. Sušárna v tomto případě zajišťuje efektivní snížení vlhkosti zplyňovaného paliva na stabilní akceptovatelnou úroveň (< 10 % hm.) a tak zajišťuje potřebnou provozní stabilitu generátoru a přijatelnou hodnotu účinnost výroby studeného plynu. Další klíčovou podmínkou úspěšného komerčního provozu, je také otázka zajištění potřebné kvality plynu (složení a obsahu nečistot), kterou bohužel nelze vždy dosáhnout jen optimalizací provozních podmínek generátoru. Způsoby a postupy umožňující dosažení potřebné kvality plynu (složení a obsah nečistot) jsou uvedeny a diskutovány v následujících kapitolách.

POŽADAVKY PLYNOVÝCH MOTORŮ NA KVALITU PLYNU

Nejrozšířenějším zařízením pro výrobu elektrické energie z plynu zůstává i nadále spalovací motor především díky vysoké účinnosti (η_{kl}). Nízká výhřevnost generátorového plynu ve srovnání se zemním plynem (ZP) a zkapalněnými uhlovodíkovými plyny (LPG) snižuje výkon stejného motoru o 20 až 40 % v závislosti na jeho konstrukci. Také si je nutno uvědomit, že samotný proces spalování probíhá za podstatně nižšího objemového poměru palivu ke vzduchu, který leží v rozmezí 1:1 až 1:2 oproti cca 1:10 pro ZP nebo cca 1:24 u LPG. Spalování nízkovýhřevných plynů v motoru tak vyžaduje jejich větší tok do směšovací komory před motorem. Pokles výkonu motoru lze kompenzovat zvýšením kompresního poměru, respektive přeplyňováním motoru turbodmychadlem, které také zvýší i jeho celkovou účinnost.

Tab. 2. Požadavky na kvalitu a čistotu generátorového plynu pro spalovací motory

Sledovaný parametr	Hodnota
Vstupní teplota, °C	< 40
Relativní vlhkost plynu, %	< 80
Prach, mg/m ³	maximální přípustná: < 50 doporučovaná: 5
Velikost částic, μm	< 5
Obsah dehtu v plynu, mg/m ³	mezní: 50-500 doporučovaná: 5 ^{***} -50
Kyseliny, mg/m ³	< 50 ^{**}
Síra celková, mg/m ³ ^{***}	< 700
(HCl + 2xHF), mg/m ³ ^{***}	< 100
NH ₃ , mg/m ³ ^{***}	není limitován ^{****}

* nižší údaje pocházejí z publikace před rokem 1995 a souvisejí s odlišnou definicí složení dehtu a metodou jeho stanovení

** vyjádřeno ve formě kyseliny octové

*** hodnoty platné pro spalování zemního plynu o energetickém obsahu 10 kWh.m⁻³ (36 MJ.m⁻³), při použití nízkovýhřevných plynů uvedené hodnoty platí pro objem plynu s energetickým obsahem zemního plynu, pro plyn s výhřevností 6 MJ.m⁻³ budou tyto hodnoty 6krát menší

**** zvyšuje emise NO_x

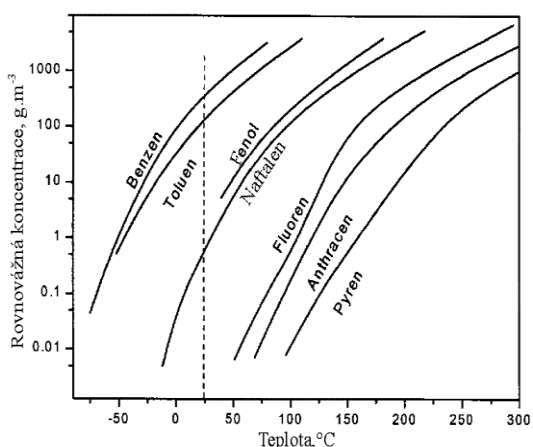
Složení plynu má zásadní vliv na spolehlivý chod motoru. Změna obsahu vodíku (H₂) a oxidu uhelnatého (CO) v plynu výrazně mění výslednou spalovací rychlost směsi a má značný vliv i na hodnotu *methanového čísla* (MČ)⁴, které popisuje odolnost směsi plynu vůči abnormálnímu exploznímu hoření (neboli detonaci) v motoru[17].

⁴ *Methanové číslo* (MČ) je ekvivalentem oktanového čísla (OČ) používaného u benzínu pro charakterizaci jeho odolnosti vůči detonaci v motoru s proměnlivým stupněm komprese. MČ s číslem 80 určuje stejnou odolnost neznámého hořlavého plynu jako směs 80 % methanu a 20 % vodíku. U neznámé směsi s MČ = 140 nastává detonace v motoru, za stejného kompresního poměru, jako v případě spalování směsi 60 % methanu a 40 % oxidu uhličitého. [17].

Plynná paliva s vyšším MČ je možno spalovat za vyšších kompresních poměrů a tak dosáhnout i vyšší účinnosti motoru. Vysoký obsah vodíku v plynu zvyšuje spalovací rychlost, zatímco oxidu uhelnatý ji naopak snižuje. Inertní a nehořlavé složky (N_2 a CO_2) přítomné v plynu působí jako inhibitory detonace a tak zvyšují i hodnotu MČ. Spalování typického plynu vznikajícího zplyňováním biomasy vzduchem obsahujícího minimálně 40% N_2 a 10 % CO_2 je tak možno provádět za kompresního poměru v rozmezí 10:1 až 12:1. Zde je nutno připomenout, že vniknutí vlhkého, nebo nevhodně upraveného paliva do souproutého generátoru typu Imbert může na určitou dobu způsobit změnu složení plynu vedoucí k poklesu hodnoty MČ a tak zapříčinit klepání jinak dobře vyladěného motoru. Snižováním úhlu (předstihu) zapalování lze takto vznikající detonaci do určité míry potlačit, ovšem za cenu snížení výkonu a účinnosti motoru a zvýšení jeho emisí. K hlavním nežádoucím složkám patří prachové částice (TZL) a dehet. Čistota plynu ovlivňuje jak celkovou životnost motoru, tak i intervaly jeho servisní údržby. Přehled maximálních a doporučených hodnot nežádoucích složek v plynu určeném pro bezpečné spalování v motoru je uveden v Tab. 2. Lze konstatovat, že přeplňované motory jsou citlivější na obsah nečistot v plynu než jejich atmosférické analogy.

Jako mezní velikost prachových částic v plynu se uvádí hodnota $5 \mu m$ a jejich mezní obsah $5 mg/m^3$. Větší prachové částice způsobují rychlejší opotřebování pohyblivých částí motoru mezi které patří dmychadlo turbíny a jeho lopatky, těsnící kroužky válců apod.. Menší částice ($< 5 \mu m$) sice nepůsobí abrazivně na pohyblivé části motoru, ale bohužel jsou strhávány do mazacího oleje. TZL v plynu ze zplyňování biomasy jsou převážně zastoupeny uhlíkatými zbytky s vysokým obsahem popelovin bohatých na sloučeniny alkalických kovů (Na, K, Ca), a to hlavně v případě jemných TZL. V důsledku nedostatečné filtrace plynu nastává intenzivní znehodnocování motorového oleje nejen jemnými částicemi zanášejícími olejové filtry, ale také se zvyšuje popelnatost oleje a stoupá i jeho alkalita. V důsledku kontaminace klesá životnost olejové náplně na polovinu až čtvrtinu časové lhůty výměny oleje ve srovnání s provozem motoru na ZP.

Dehet je náchylný ke kondenzaci na studených částech motoru a při ochlazování plynu v přítomnosti jemných TZL ($< 5 \mu m$) tvoří stabilní aerosoly. Při nedokonalém spalování aerosolu v důsledku specifických podmínek v motoru (nízká teplota a přebytek vzduchu) mohou vznikat saze. V kombinaci s poléťavými TZL, přítomnými ve špatně vyčištěném plynu, probíhá adsorpce dehtu na uhlíkatém povrchu TZL už usazených v prostoru motoru a to i za vyšší teploty. Po delší době, a hlavně při cyklickém kolísání teplot, tvoří zachycené dehty pevné nánosy, které jsou postupně transformovány na tvrdý koks. Z uvedeného důvodu je kombinace TZL a dehtu v plynu nejnebezpečnější a proces vzniku nežádoucích usazenin je urychlován jejich společným působením. Uvedený mechanismus zvyšuje rychlost tvorby úsad v motoru a proto je také nebezpečný. Vzniklý koks po jeho náhodném uvolnění způsobuje problémy s poškozováním vnitřních částí motoru, a také přispívá ke znečištění motorového oleje.



Obr. 1. Tenze par vybraných složek dehtu v závislosti na teplotě [18]

Značné rozdíly v množství dehtu doporučených různými zdroji (5 až $50 mg/m^3$) jsou způsobeny použitím odlišné definice dehtu (u různých autorů jsou do skupiny dehtu zahrnuty různé sloučeniny), různými metodami jeho stanovení (chromatografický, gravimetrický dehet) a také různou tolerancí samotných motorů,

kteřá, jak už bylo řečeno, je vyšší u motoru atmosférických [16]. Hlavní podmínkou je omezení kondenzace výševroucích složek dehtu v plynu. Množství přípustného obsahu dehtu v plynu je tak závislé na sací teplotě a tlaku. Lehčí uhlovodíky (benzen, toluen, xyleny) přítomné v plynu ze zplyňování biomasy v koncentracích od 5 až do 20 g/m³ jsou při teplotě sání v plynném stavu, a tak nehrozí jejich kondenzace. Rovnovážná tenze toluenu při 0, 15, 25 a 30 °C odpovídá jeho obsahu v plynu 36.6, 89.7, 154 a 179 g/m³, v případě naftalenu jsou rovnovážné hodnoty obsahu podstatně nižší: 0.20, 0.74, 1.61 a 2.31 g/m³. U složek dehtu s vyšším bodem varu (acenaften, fenantren, fluoranten, pyren a další) se aerosoly v plynu tvoří při podstatě nižších obsazích v plynu. Srovnání rovnovážného obsahu vybraných složek dehtu pro různé teploty je uvedeno na Obr. 1. Při zvyšování sací teploty plynu stupeň tolerance motoru k obsahu dehtu stoupá, při zvyšování sacího tlaku prostřednictvím turbodmychadla naopak klesá. U přeplňovaných motorů lze očekávat kondenzaci a tvorbu aerosolu výševroucích podílů dehtu v prostoru mezichladiče umístěného za turbodmychadlem, kde je ohřátá stlačená hořlavá směs ochlazována na teplotu plnění motoru. Zde je také nutno uvědomit, že zvýšení vstupní teploty plynu do spalovacího prostoru poněkud snižuje výkon motoru a jeho účinnost a z tohoto důvodu by plnicí teplota neměla být vyšší než 40 °C.

Z požadavků současných spalovacích motorů vyplývá bezpodmínečně nutnost dokonalého zbavení spalovaného plynu TZL na hodnotu pod 5 mg/m³. Praktické zkušenosti s provozem atmosférických motorů ukazují, že některé spalovací motory jsou schopné pracovat s plynem obsahujícím TZL v plynu okolo 20 až 30 mg/m³, ale za cenu snížení doby mezi výměnou olejové náplně a olejových filtrů, což všeobecně zvýší provozní náklady [19].

Zařízení pro odstraňování dehtu by mělo snížit kondenzující podíl na bezpečnou hodnotu okolo 5 až 50 mg/m³. Uvedené hodnoty platí pro obsah kondenzujících podílů výševroucích dehtů za podmínek na vstupu plynu do spalovacího prostoru motoru (teplota, tlak, spalovací poměr). V praxi to znamená, že obsah dehtu před motorem (definovaném podle Tar protokolu) může mít hodnotu mnohonásobně vyšší. Jsou známé příklady zplyňovacích zařízení (Zplyňování vodní parou v generátoru FICFB v Güsingu), kdy ve spalovacím motoru (Jenbacher J620) byl spalován plyn s vyšším obsahem dehtu (dle Tar protokolu více než 2500 mg/m³) přičemž nedocházelo k provozním komplikacím a k žádnému poškození [20]. Zkušenosti s provozem většiny zařízení instalovaných v ČR (viz Tab. 1) také ukazují, že pro hodnocení obsahu dehtu v plynu spalovaného v motoru, lépe vyhovuje jeho vyjádření jako suma všech organických sloučenin s bodem varu vyšším než má fenol (který je zahrnut do skupiny dehtu, dále v textu jmenovaný jako „motorový dehet“). Těkavé složky (toluen, xyleny, C₂-benzeny) jsou za těchto podmínek v plynném stavu a nezpůsobují problémy při spalování. Obsah takto definovaného „motorového dehtu“ se u většiny generátorů uvedených v Tab. 1 pohyboval od 250 do 1300 mg/m³, a při dodržení podmínky dokonalého zbavení plynu TZL prostřednictvím horkých filtrů, tento obsah v žádném z námi pozorovaných případů nezpůsobil fatální poškození nebo selhání motoru při provozu. Z hlediska dlouhodobého a spolehlivého provozu je nutno obsah dehtu snížit na hodnotu přijatelnou pro daný typ motoru (závisí na teplotě a tlaku sání).

ČIŠTĚNÍ PLYNU

Správný a spolehlivý provoz zařízení pro zajištění potřebné kvality plynu patří k nejdůležitější části celé kogenerační jednotky. V současné době jsou nejvíce rozšířeny dva koncepčně odlišné způsoby snižování obsahu nečistot v plynu za generátorem.

V prvním případě se jedná o odstraňování TZL a dehtu za vyšší teploty plynu přímo na výstupu z generátoru (250 až 650°C), které umožňuje získat tepelnou energii k výrobě vysokopotenciálového tepla. Za teplot nad 600°C také lze za pomoci katalyzátoru termochemicky štěpit dehet. Při kombinaci obou uvedených procesů nastává oddělené čištění plynu od TZL a dehtu, a to při teplotách nad bodem kondenzace vodní páry z plynu (suchý proces). Teprve po vychlazení už vyčištěného plynu dojde ke kondenzaci nadbytečné vodní páry z plynu.

Druhým způsobem čištění plynu je jeho přímé chlazení nastříkovanou vodou (mokré čištění plynu) a současné odstraňování jak TZL, tak i dehtu z plynu. Jedná se o jednodušší a méně technicky náročnou provozní technologii. Proto se „mokré čištění“ používá u většiny zařízení instalovaných v ČR a uvedených v Tab. 1. Při ochlazení plynu pod teplotu rosného bodu organických látek nastává tvorba jemných hydrofobních kapiček dehtu

a vzniká stabilní aerosol. Je zřejmé, že za pomoci vodní pračky lze z plynu odloučit jenom tu ve vodě nerozpustnou část dehtu, která má rosný bod vyšší, než je teplota v pračce. V plynu za těchto podmínek (teplota a tlak v pračce) zůstane nezkondenzovaný rovnovážný podíl dehtu ale zároveň vznikají i kapičky jemného dehtového aerosolu. V ideálním případě zachycení všech jemných aerosolu dehtu by nižší teplota prací kapaliny měla snížit obsah dehtu až na hodnotu rovnovážné tenze par jednotlivých složek dehtu. Ve skutečnosti však, díky úniku jemného aerosolu jsou zbytkové obsahy dehtu v plynu za vodní pračkou vyšší. Hlavní nevýhodou „mokrého vodního čištění“ plynu je nižší účinnost jak odstraňování TZL, tak i dehtu. Mimo jiné také dochází k produkci nežádoucí odpadní vody, znečištěné dehty a TZL, jejíž likvidace zvyšuje investiční a provozní náklady celé kogenerační jednotky. Podrobnější technologické schéma spolehlivě a dlouhodobě fungujícího komplexního systému čištění plynu a odstraňování TZL a dehtu je rozebráno na příkladu spolehlivě fungující kogenerační elektrárny o maximálním výkonu 200 kW_e pracující v areálu společnosti Tarpo a.s. v obci Kněžves u Rakovníka.

POPIS ELEKTRÁRNY VYUŽÍVAJÍCÍ SOUPROUDÉHO ZPLYŇOVACÍHO GENERÁTORU GP300

Pro výrobu hořlavého plynu je použita drcená dřevní hmota, která je po vysušení v sušárně zplyňována v souproudém generátoru upravené konstrukce. Surový vystupující plyn je zbaven TZL na výstupu z generátoru v horkých rukávcových filtrech. Po jeho ochlazení a absorpčním vypírání olejem je už vyčištěný plyn veden do stroje, kde je spalován v upravených motorech ČKD Hořovice (6S160, 6 válců, 27 dm³) o výkonu 100 kW_e. Ve strojně se nachází více motorů, které byly upraveny pro spalování plynu ze zplyňovacího generátoru. Současně je možné provozovat až dva motory na jeden generátor při celkovém výkonu soustavy až 200 kW_e. Spaliny z motoru po jejich ochlazení a následném naředění vzduchem na potřebnou teplotu (cca 100 °C) jsou použity pro sušení surového paliva v sušárně. Celé zařízení pracuje v bezobslužném automatickém režimu. Pouze doprava a manipulace se vstupní různorodou surovinou (odpad z dřevovýroby a dřevozpracování) před drcením a disintegrací se provádí za účasti zaměstnanců společnosti. Technologické schéma celé kogenerační jednotky (mimo sušící a štípací část) je uvedeno na Obr. 2. Základní technologické údaje jsou uvedeny v Tab. 3.

Tab. 3. Základní parametry elektrárny na bázi souproudého generátoru

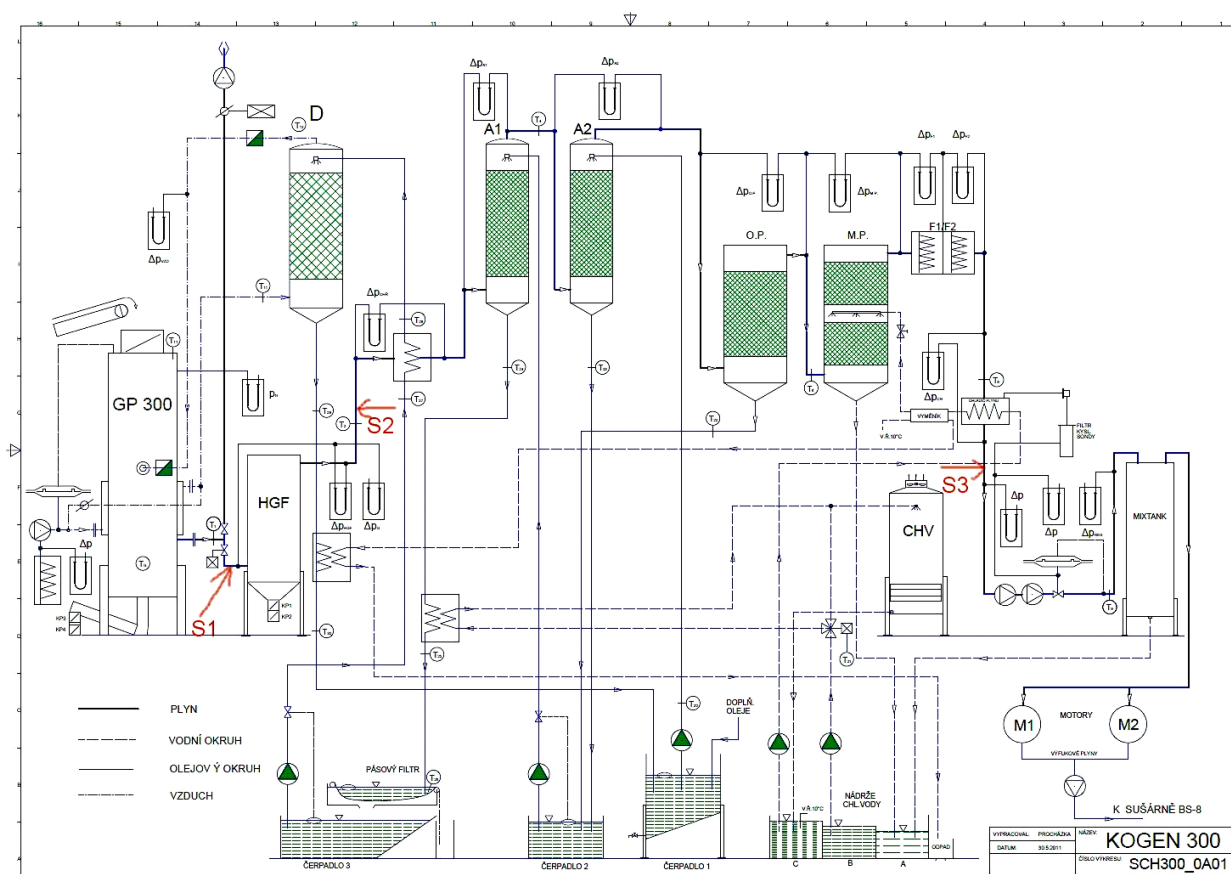
Parametr jednotky	Hodnota
Měrná spotřeba paliva:	105 kg/hod (100kW _e)
Specifická spotřeba paliva (suché)	1,05kg/kWh _{el}
Účinnosti zplyňování (výroby plynného paliva, η_{pl})	75 %
Účinnost kogenerační jednotky (η_{kj})	32 %
Elektrická účinnost elektrárny (η_{ce})	24 %
Vlhkost vstupní biomasy	max. 60 %
Odstraňování TZL:	Keramické svíčkové filtry, 400-520°C
Odstraňování dehtu:	praní olejem: 60°C, regenerace 120°C
Spalovací motor:	2x 6S160 ČKD Hořovice

Úprava, příprava a dávkování paliva

Surová dřevní hmota je charakterizována vysokým obsahem vlhkosti (min 50 % hm.), a jak je známo vysoký obsah vlhkosti znemožňuje její přímé zplyňování v souproudém generátoru. Účinnost výroby studeného plynu (η_p) produkovaného souproudým generátorem lze do jisté míry zvýšit použitím paliva s nižším obsahem vlhkosti. Snížení energetických nákladů spojených z odstraňováním nadbytečné vlhkosti je zajištěno použitím nízkopotenciálního tepla spalin z motoru naředěných vzduchem a zavedených do perforované podlahy fluidní pásové hrabicové sušárny uvedené na Obr. 3a. Její hlavní výhodou je vysoká sušící účinnost a využití odpadního nízkopotenciálního tepla spalin o teplotě okolo 90 °C. Teplota odcházejících brýdových par se pohybuje okolo 30 °C. Nízká sušící teplota snižuje nebezpečí samovolného vznícení sušeného materiálu. Maximální výkon uvedené sušárny dosahuje až 300 kg/h. Za běžného provozu je sušárna schopna usušit palivo o surové vlhkosti až 60 % hm. Štěpka se do sušárny přivádí pásovou dopravou z mezizásobníku paliva, kam je dopravována rovněž pasovým dopravníkem ze štípačky dřeva (Obr. 3). Rychlost hrabicového dopravníku sušárny je regulována dle požadavků na výkon kogenerační jednotky s ohledem na hodnotu výstupní vlhkosti paliva, která se pohybuje okolo 4 až 10 %. Základní vlastnosti paliva jsou uvedeny v Tab. 4.

Tab. 4. Vlastnosti typického paliva na vstupu do generátoru po jeho vysušení

Vlastnost	Veličina	Vstup ze sušárny	Suchý vzorek (d)	Stav (daf)
vlhkost, W	% hm.	6,95	0	0
hořlavina, H	% hm.	91,72	98,57	100
popel, A	% hm.	1,33	1,43	0
prchavá hořlavina, V	% hm.	71,38	76,71	77,82
fixní uhlík, FC	% hm.	20,34	21,86	22,18
C	% hm.	45,09	48,46	49,16
H	% hm.	5,78	6,21	6,30
O	% hm.	0,16	0,17	0,18
N	% hm.	40,67	43,70	44,34
S	% hm.	0,03	0,03	0,03
Spalné teplo, Q_s	MJ/kg	18,34	19,71	19,99
Výhřevnost, Q_i	MJ/kg	17,08	18,35	18,62



Obr. 2. Technologické schéma kogenerační jednotky Kogen 300

GP300 – souproudý zplyňovací generátor, HGF – horký generátorový filtr pro odstraňování TZL, A1,A2-olejové absorbery, D- stripovací kolona, CHV- chladicí věž na vodu, O.P.-lapač olejových kapek, M.P.-vodní pracka, kondenzátor vlhkosti z plynu, M1,M2- spalovací motorgenerátory (ČKD Hořovice, 6S160), mixtank – zásobník plynu, pro zajištění průměrného složení plynu. S1- odběr vzorku plynu za generátorem, S2- odběr vzorku plynu za HGF, S3- odběr vzorku plynu před motorem

Zplyňovací generátor

Srdcem kogenerační jednotky je souproudý zplyňovací generátor (viz Obr. 4a), jehož konstrukce byla upravena pro zplyňování dřevní štěpky o velikosti částic 4 až 20 mm. Celkem bylo v průběhu několika let ověřeno několik vnitřních konstrukcí generátoru. Hlavním cílem „modernizace“ byla snaha rozšířit parametry zpracované štěpky a zvýšit výkonostní zatížení systému. Na rozdíl od klasického Imbertu nemá uvedený typ zúžení průřezu generátoru v žárovém pásmu a homogenního rozložení teplot je dosaženo díky použití důmyslného systému

distribuce zplyňovacího vzduchu a nuceného pohybu roštu generátoru. Pro zplyňování se používá přehřátý vzduch obohacený o těkavější složky dehtu, získané provzdušňováním pracovního oleje při teplotě 100 až 120 °C. Teplota plynu vystupujícího z generátoru se pohybuje v rozmezí 400 až 500 °C v závislosti na jeho výkonu. Takto produkovaný plyn je ihned odváděn do horkého filtru (HGF), kde probíhá odstraňování TZL z plynu (viz Obr. 4b).

a) celkový pohled sušárny



b) příprava paliva a jeho mezi zásobník



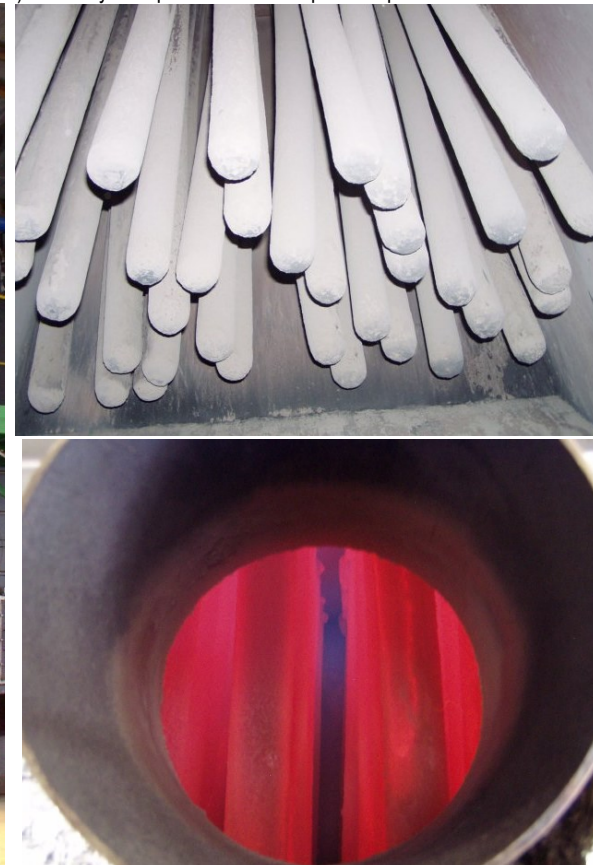
Obr. 3. Fluidní pásová hrabicová sušárna a úsek přípravy paliva

1 – přívod surové drcené biomasy z její meziskladu, 2 – distribuce naředěných vzduchem spalín z motoru, 3 – tělo sušárny s hrabicovým podavačem, 4 – pásový dopravník vysušeného materiálu k generátoru, 5 – pásový dopravník vlhkého materiálu, 6 – distributor dřevní štěpky, 7 – pásové hrabice

a) Souprůdý generátor GP300 s horkým filtrem



b) elementy filtru při odstávce a za provozu při 390 -550 °C



Obr. 4. Souprůdý zplyňovací generátor GP300 s horkým filtrem pro odstraňování TZL

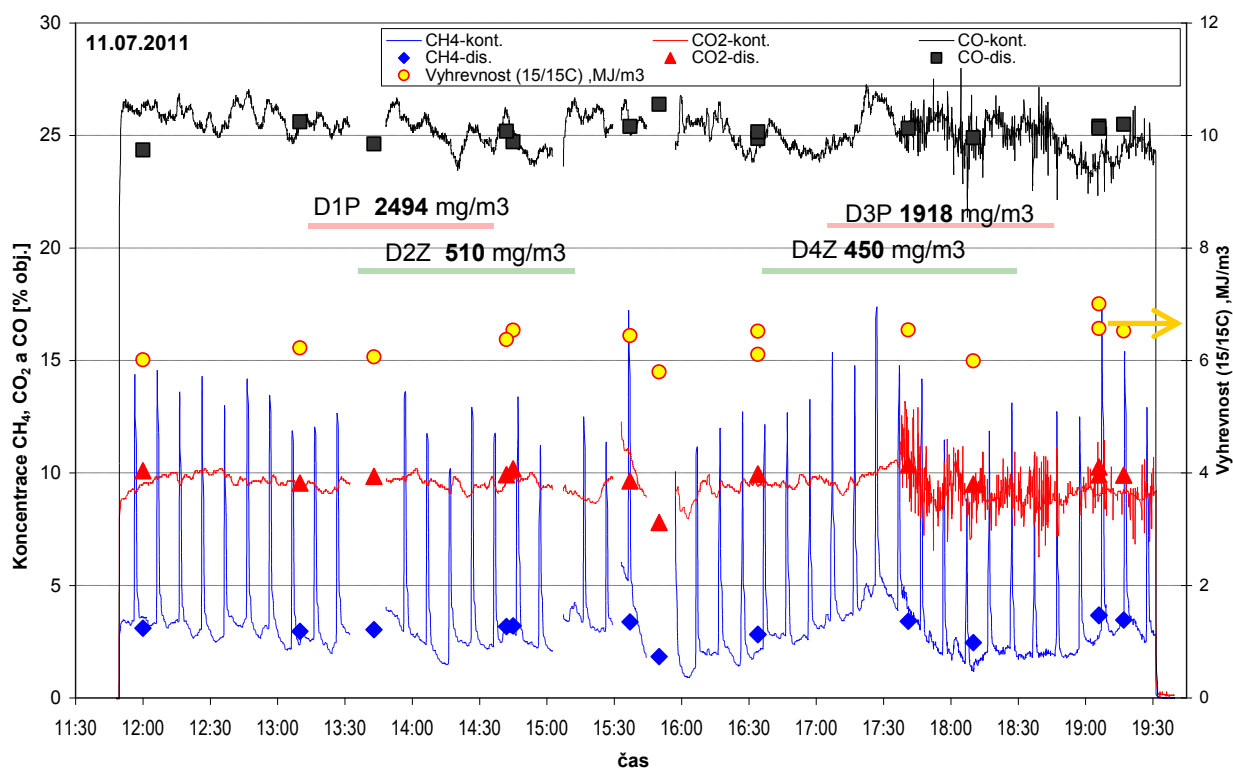
1 – souprůdý zplyňovací generátor, 2- tryska pro přívod zplyňovacího vzduchu, 3- systém přehřevu zplyňovacího vzduchu, 4- odvod popele z generátoru, 5- výstup plynu z generátoru a jeho vstup do horkého filtru, 6 – horký generátorový filtr (HGF) pro odstraňování TZL, 7- odvod TZL z horkého filtru, 8-olejové absorbéry

Čistící systém a účinnost čištění

Čistící zařízení je řešené kombinací horkého filtru a fyzikálního absorbéru, kde pro odstraňování dehtu je použit cirkulující prací organický olej. Ve světě je známo mnoho aplikací využívajících kombinaci filtrace a praní za pomoci MEŘO (např. systém čištění realizovaný v Güssingu[20]), přesto daný realizovaný systém má z mnoha hledisek unikátní charakter, který umožňuje podstatně snížit jeho provozní náklady.

Odstraňování TZL

TZL z horkého surového generátorového plynu jsou odstraňovány jako první pomocí bariérových horkých filtrů (viz Obr. 4b) pracujících při teplotách v rozmezí 390 až 550°C. Při filtraci vzniká na povrchu filtru filtrační koláč složený ze zachycených TZL, na kterém se zvyšuje tlaková ztráta. Až její hodnota dosáhne kritické veličiny (např. 1 kPa), automaticky se provede regenerace povrchu filtru impulsním zpětným proplachem a proces filtrace pokračuje dále. Zkušenosti z vysokoteplotní filtrace TZL z plynu produkovaného zplyňováním biomasy ukazují na to, že hlavním problémem je životnost jednotlivých filtračních elementů a stálý nárůst permanentní tlakové ztráty čistého filtru v důsledku jeho postupného zanášení anorganickými podíly. Tento problém je často způsoben samotným provozovatelem, a to v důsledku porušování postupu při najíždění studeného filtračního zařízení. Před zahájením provozu je nutno celé filtrační zařízení ohřát na potřebnou provozní teplotu, aby se tak zabránilo kondenzaci dehtu a vlhkosti na jeho pracovním povrchu. Životnost filtru a jeho materiálu také souvisí i se způsobem a intenzitou jeho regenerace. Ve většině případů se používá regenerace za pomoci tlakové vlny. Doba a velikost tlakového rázu musí být zvolena tak, aby byla dostatečná pro odstranění filtračního koláče zachycených TZL z povrchu filtru, a zároveň aby byla bezpečná, aby nenastalo poškození dostatečně pružných, ale ne moc mechanicky pevných filtrů. Důležitou roli hraje způsob zachycení jednotlivých filtračních elementů a správný přívod a distribuce surového plynu.



Obr. 5. Záznam obsahu CH_4 , CO a CO_2 v plynu ze zplyňovacího generátoru GP300

D1P- obsah dehtu za generátorem, D2Z - před motorem, D3P – za HGF, D4Z – před motorem

K pulsnímu proplachu pracovního povrchu filtrů byly použity různé druhy regeneračních plynů. Po optimalizaci všech provozních parametrů horkého filtru se bezporuchová provozní doba celého systému zvýšila

na několik měsíců a obsah TZL v plynu za filtrem se pohyboval na nízkých hodnotách ($<1 \text{ mg/m}^3$). Provozní tlaková ztráta filtru se pohybovala v obvyklých provozních mezích (0,4 až 1 kPa). Na Obr. 5 je uveden záznam obsahu hlavních složek plynu pořízených za pomoci IČ analyzátoru. Na záznamu obsahu methanu v plynu jsou vidět pravidelné výkyvy (pulsy), způsobené použitím regeneračního plynu na filtrech, na jehož obsah je také citlivé měřicí methanové čidlo (IR analyzátor). Jak je vidět, v ustáleném stavu se regenerace filtrační plochy prováděla jednou za cca 600 s. Optimalizace způsobu proplachu, tj. délka tlakového impulsu a periody mezi impulsy umožnila snížit spotřebu regeneračního topného plynu na hodnotu okolo 30 kg/týden pro provoz 100 kW_e kogenerační jednotky. Plyn vystupující z horkého filtru (HGF) dále prochází chladičem regenerovaného pracího oleje a vstupuje do prvního absorbéru s olejem (A1).

Olejová pračka pro odstraňování dehtu s regenerací pracího oleje.

Vypírání pracím olejem realizované v uvedené jednotce má několik praktických výhod. Složky dehtu a prací kapaliny jsou vzájemně dobře rozpustné, a proto v podmínkách absorbéru nejsou kapičky aerosolu dehtu stabilní a jsou snadno zachycované v oleji. V použitém zařízení absorpce probíhá ve dvou absorbérech (A1 a A2, viz Obr. 2). Do prvního vstupuje plyn vycházející z filtru (HGF) a procházející chladičem plynu, ve kterém se přehřívá ochlazený a vyfiltrovaný prací olej z prvního absorbéru (A1) dále nastříkovaný do stripovací komory (D). V prvním absorbéru (A1) nejen proběhne zachycení výševroucích podílů dehtu, ale také jeho kontaktní chlazení plynem olejem z teploty 160°C na teplotu okolo 80°C. Po zchlazení nastává filtrace oleje na pásovém filtru, na kterém se zachycují málo rozpustné a výševroucí složky dehtu. Do druhého absorbéru (A2) vstupuje předčištěný a vychlazený plyn, kde se práním za pomoci oleje zbaví další části nežádoucích dehtů. Za druhým absorbérem následuje lapač olejových kapek, který vrací takto zachycený olej do druhé olejové pračky (A2). Plyn zbavený dehtu dále vstupuje do lapače olejových kapek (O.P.), kontaktního vodního chladiče (vodní pračky M.P.), ve kterých dochází ke kondenzaci vodní páry ($t_{\text{tb}}=15^\circ\text{C}$) a probíhá i vypírání zbylých anorganických sloučenin (NH_3 , H_2S , HCl apod.). Před spálením v motorech (M1 a M2) plyn proudí přes pojistné filtry, prochází dmychadlem s regulovanou hladinou výstupního tlaku a vstupuje do vyrovnávací nádoby (mixtank) ze které je rozváděn k motorům.

Zbytková koncentrace dehtu v plynu za olejovým absorbérem (A1 a A2) se řídí Henryho zákonem a je úměrná celkovému tlaku a obsahu dehtu v pracím oleji a s rostoucí teplotou stoupá. Na rozdíl od vypírání studenou vodou lze však dosáhnout nižšího obsahu dehtu ve vyčištěném plynu a to za vyšší pracovní teploty (60 až 80 °C). S rostoucím obsahem dehtu v pracím oleji rovnovážná koncentrace dehtu v plynu roste úměrně obsahu dehtu v pracím oleji v důsledku čehož účinnost odstraňování dehtu klesá a je nutno prací olej nahradit novým, případně provést jeho regeneraci. Ve většině zahraničních aplikací využívajících pro odstraňování dehtu pracího oleje (převážně methyl esteru řepkového oleje, MEŘO) se jeho regenerace neprovádí a znečištěný olej se spaluje v generátoru, v důsledku čehož stoupají provozní náklady. V uvedeném zařízení je prací olej regenerován ve stripovací komoře zplyňovacím vzduchem při teplotě 120°C, kdy je po ochlazení vrácen do olejového zásobníku prvního absorbéru (A1). Toto opatření má pozitivní vliv jak na energetickou bilanci kogenerační jednotky, neboť zachycené uhlovodíky jsou zpětně vráceny do procesu, tak i na ekonomickou, neboť není zapotřebí provádět doplňování pracího oleje do olejové pračky.

Při dlouhodobém experimentálním provozu olejové pračky bylo zjištěno, že v případě vyšších obsahů dehtu v surovém plynu (Tar Protocol, $>2 \text{ g/m}^3$) nastává během dlouhodobého provozu hromadění výševroucích podílů dehtu v pracím oleji a pozvolně narůstá množství pracího oleje. Málo rozpustné podíly takto zachycených složek dehtu jsou vylučovány ve formě krystalků které jsou odstraňovány na pásovém olejovém filtru (viz Obr. 2) a jsou spolehlivě likvidovány v generátoru. Pochopitelně, že při zvýšení obsahu dehtu v plynu také narůstá zatížení olejové vypírky a stoupá i množství odfiltrovaných výševroucích podílů dehtu. Při nízkém obsahu dehtu v surovém plynu (Tar Protocol, $<0,5 \text{ g/m}^3$) byl zaznamenán mírný pokles objemu pracího oleje v pračce, jehož ztráta nepřekračovala 10 litrů/týden provozu jednoho spalovacího motoru.

Nespornou výhodou uvedeného čistícího systému v návaznosti na následné spalování plynu v motoru je jeho řízená selektivita vůči zachycení výševroucích složek dehtu, které jsou kvantitativně odstraňovány z plynu. Oproti tomu lehčí uhlovodíky (benzen, toluen a xyleny) zůstávají v plynu, a tak zvyšují hodnotu výhřevnosti plynu a příznivě ovlivňují provoz spalovacích motorů.

Spalovací motor

Stávající spalovací motor použitý v kogenerační jednotce malé elektrárny je původním pomaluběžným naftovým motorem z 60. let (ČKD Hořovice, typ 6S160, 6 válců o objemu 27 l) předělaný na spalování zemního plynu. Při přestavbě byl do hlavy válců nainstalován systém nuceného zážehu zapalovací svíčkou, byla snížena komprese ve válcích z původní 1:17 na 1:11 a také provedena značná úprava sacího a výfukového ventilového systému. V důsledku takto provedených úprav se účinnost motoru snížila z původních 35% pro naftu na 32 % pro produkovaný plyn a výkon poklesl z původních 132 kW_e na 100 kW_e. Časem se však ukázala potřeba výměny sacích a vypouštěcích ventilů, instalace systému zaměřeného na potlačení detonace ve válcích a zpětného prošlehu plamene do spalovací směsi prostřednictvím instalace flashback arestoru. Bohužel se také ukázalo, že takto upravené atmosférické motory zdaleka nedosahují účinností a měrných výkonů moderních přeplňovaných motorů (cca 35%), ale přesto jsou spolehlivou a levnou alternativou.

V motorové hale elektrárny je umístěno celkem 5 motorů ČKD, z nichž dva je možno současně zapojit pro odběr plynu ze zplyňovacího generátoru. Většinu času byl systém provozován na jeden motor o plném výkonu. Dva motory společně se používaly v případech, kdy bylo zapotřebí zjistit vliv zvýšeného zatížení na chování generátoru a účinnost komplexního čistícího systému. Kvůli potřebným úpravám a servisním zásahům byly motory také používány střídavě.

Dlouhodobé experimenty ukázaly, že plyn produkovaný v generátoru lze v uvedeném upraveném motoru poměrně dobře spalovat. Měření emisí prováděných autorizovanou měřicí skupinou ukázala nízký obsah NO_x a CO ve spalínách. Největším přínosem dlouhodobého provozu bylo zjištění míry odolnosti uvedeného typu motoru vůči spalování plynu zbaveného TZL s určitým obsahem dehtu. Hodnoty obsahu „motorového dehtu“ do 500 mg/m³ uvedené v Tab. 2 jsou pro daný typ motoru zcela bezpečné. Při dlouhodobém provozu nebyly v sacím systému a spalovacím prostoru zaznamenány žádné usazeniny a nánosy, stejně jako nebylo zjištěno zanášení pojistných filtrů na vstupu plynu do motoru.



Obr. 6. Motory ČKD Hořovice v elektrárně



Obr. 7. Vzhled absorpčních roztoků pro stanovení obsahu dehtu v plynu (Popis viz Obr. 5)

Složení plynu na výstupu z generátoru a obsah dehtu v plynu

Kontinuální záznam složení plynu produkovaného generátorem po jeho několika úpravách je uveden na Obr. 5. V Tab. 5 je také uvedeno průměrné složení plynu. Podle složení se jedná se o typický nízkovýhřevný plyn, kde jsou majoritními složkami dusík, oxid uhelnatý, vodík, oxid uhlíčitý a methan. Průměrná hodnota výhřevnosti plynu se pohybuje okolo 6,0 až 6,5 MJ/m³ (viz Obr. 5).

V Tab. 5 je zároveň vidět, že úpravy zplyňovacího generátoru přispěly ke zvýšení obsahu methanu a oxidu uhelnatého, mírnému poklesu obsahu vodíku a poklesu obsahu oxidu uhlíčitýho a dusíku. Obsah butanu a propanu v průměrném složení je poněkud vyšší, než u běžného plynu ze zplyňování a je způsoben použitím směsi uvedených plynů pro regeneraci filtrační plochy HGF. Několik vzorků analyzovaného plynu bylo odebráno přímo v okamžiku, kdy byla prováděna tlaková regenerace HGF.

Tab. 5. Průměrné složení plynu produkovaného zplyňovacím generátorem před a po jeho rekonstrukci

datum měření	2009.03.10		2011.07.11		2011.08.12	
místo odběru	za gen.	za HGF	za gen.	před mot.	za HGF	před mot.
sloučeniny	obsah*, % obj.					
O ₂ ve vzorku**	1,82	1,29	2,36	1,99	1,20	1,29
CO ₂	10,95	11,32	9,57	9,99	10,02	9,22
H ₂	18,79	18,86	17,19	16,70	18,67	16,76
CO	22,05	21,09	25,51	24,80	24,40	25,07
CH ₄	1,88	1,70	3,04	3,00	3,00	2,96
N ₂	45,60	46,22	43,40	44,21	42,74	44,73
Ar***	0,57	0,54	0,51	0,52	0,50	0,52
ethan	0,018	0,014	0,090	0,090	0,071	0,074
ethylen	0,128	0,101	0,487	0,500	0,464	0,490
acetylen	0,002	0,001	0,042	0,042	0,042	0,086
propan	0,004	0,076	0,061	0,053	0,025	0,027
propen	0,004	0,002	0,043	0,044	0,027	0,028
buthany	0,005	0,051	0,001	0,001	<0,001	<0,001
1,3-butadien	0,001	<0,001	0,010	0,010	0,006	0,007
propin	<0,001	0	0,004	0,004	0,003	0,004
1-buten-3-in	0	0	0,001	0,001	<0,001	0,001
cyklopentadien	0	0	0,002	0,001	<0,001	<0,001
benzen	0,009	0,012	0,033	0,037	0,019	0,015
toluen	0,001	<0,001	0,003	0,005	0,001	0,001
ostatní	0,001	0,001	0,010	0,010	0,004	0,00
Výhřevnost Q _i (15/15C), MJ/m ³	5,31	5,24	6,35	6,21	6,25	6,16
Výhřevnost Q _i (0/0C), MJ/m ³	5,60	5,52	6,70	6,55	6,59	6,50

* - pod hranici detekce 0,0001% obj.

* obsah po korekci složení plynu na nulový obsah O₂ v plynu

** obsah kyslíku v původním vzorku po normalizaci

*** hodnota byla vypočtena z hmotnostní bilance

Změna složení ukazuje na snížení zplyňovacího poměru a pokles spotřeby paliva na produkci jednoho m³ plynu. Změny konstrukce se projeví také v nárůstu obsahu uhlovodíků, což vedlo ke zvýšení výhřevnosti plynu skoro o 20 %. Ve srovnání se složením plynu produkovaném ostatními souprůdnými zplyňovacími generátory uvedenými v Tab. 1 je obsah dusíku v plynu z generátoru GP300 nejnižší. Tato skutečnost také svědčí o nízkém zplyňovacím poměru a tedy o vyšší účinnosti výroby studeného plynu (η_p).

Vzhledem k pozorovaným změnám v chodu zplyňovacího generátoru a složení plynu byla také zaznamenána i změna v obsahu a složení dehtu v surovém plynu za generátorem. Obsah dehtu v plynu a jeho složení je uvedeno v Tab. 6. Vzorky plynu pro stanovení byly odebrány z různých odběrových míst kogenerační jednotky uvedených na Obr. 2. Pro srovnání jsou zde uvedeny obsahy dehtu v plynu naměřené při provozu kogenerační jednotky s původním generátorem (2009.03.10) a po jeho všech úpravách. Jak je vidět, původní konstrukce generátoru byla i přes poněkud nižší účinnost schopna produkovat plyn s nízkým obsahem dehtu (do 200 mg/m³), který by bylo možno po odstranění TZL, zchlazení plynu a kondenzaci nadbytečné vodní páry použít přímo pro spalování v motoru, aniž by se muselo provádět odstraňování dehtu.

Odstraňování dehtu v olejové pračce je na rozdíl od konverzních katalytických procesů charakterizováno selektivitou, vhodnou pro následné spalování plynu v motoru, která nechává projít lehčí uhlovodíky do motoru (BTXS) a zároveň kompletně zachycuje složky dehtu s větším bodem varu než má fenantren (viz v Tab. 6 pod šrafovanou čarou). Za těchto podmínek také dochází k velice účinnému zachycení fenolu a jeho alkylderivátů, jejichž obsah v plynu za pračkou se zřetelně snížil. Z hlediska optimální ekonomiky byl systém nastaven tak, aby na pojistných plynových filtrech umístěných před motorem, nebyly zachyceny žádné usazeniny nebo kondenzáty.

Dlouhodobé provozní zkušenosti ukazují, že zabudovaná olejová pračka zároveň působí jako účinná pojistka zachycující vysoké koncentrace těkavějších a vyševroucích podílů dehtu (plyn v mezních provozních stavech generátoru). Takto zachycené těkavější složky dehtu, nedojde-li k včasné regeneraci pracího oleje, se budou postupně uvolňovat do čistšího plynu, ovšem v koncentracích nižších, tj. bezpečných pro provoz spalovacího motoru. Uvedený efekt byl pozorován při čištění plynu s nízkým obsahem dehtu, kdy se do něj

postupně uvolňovaly jak některé složky zachycené z plynu při studeném startu generátoru (viz. D1Z z 2009.03.10), tak i některé lehčí podíly praciho oleje (acenaften, fluoren) v důsledku poněkud vyšší adsorpční teploty (nad 80°C).

Tab. 6. Obsah organických látek (dehtu) v plynu za generátorem a před motorem

datum měření	2009.03.10		2011.07.11				2011.08.12			
vzorek číslo, #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
označení vzorku	D1P	D2K	D1P	D2Z	D3P	D4Z	D1P	D2Z	D3P	D4Z
místo odběru	za gen.	mot.	za gen.	mot.	za HGF	mot.	za HGF	mot.	za HGF	mot.
objem plynu pro stanovení, l	342,8	389,3	179,9	384,4	412,0	517,3	325,0	415,5	220,8	451,2
Sloučenina	Obsah v plynu, mg/m ³									
benzen	38,4	14,8	1273,0	737,6	540,7	523,3	883,3	560,1	1539,2	482,8
toluen	116,9	91,4	908,6	466,0	515,7	431,9	567,1	338,5	668,8	284,4
m+p+o-xylen+ethylbenzen+fenylethin	24,7	2,8	205,8	92,8	147,7	103,2	92,1	90,9	91,0	65,4
styren	36,4	16,2	295,6	154,9	213,2	153,1	154,3	120,1	140,4	104,0
C ₃ -ben. suma	3,0	1,7	29,8	22,7	29,8	15,4	11,7	15,8	2,5	9,8
ostatní ¹	1,6	0,1	<0,1	<0,1	2,0	<0,1	<0,1	<0,1	2,0	<0,1
BTX suma	221,0	126,9	2712,8	1474,0	1449,0	1226,9	1708,5	1125,4	2442,0	946,3
fenol	12,5	<0,1	480,9	12,3	390,0	14,0	180,3	9,1	166,4	9,1
methylfenoly	<0,1	<0,1	249,7	6,5	184,8	6,9	51,7	7,9	46,2	7,7
dibenzofurany ⁴	18,4	7,4	278,0	144,4	233,9	125,6	155,4	95,9	135,0	87,3
kyslíkaté suma	31,9	7,6	1008,7	163,3	808,7	146,5	387,4	112,8	347,7	104,1
dusíkaté	1,0	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0
inden+indan	0,2	1,4	126,5	42,8	47,3	34,5	30,2	21,2	23,2	18,2
naftalen	41,8	25,2	457,2	195,7	362,0	187,1	374,7	163,5	351,5	173,7
methylnaftaleny	4,7	5,1	153,7	35,9	116,1	31,6	69,8	29,0	62,6	31,1
alkylnaftaleny (alkyl >=C ₂)	0,7	5,6	70,7	9,0	46,4	7,5	25,3	6,6	21,9	6,8
bifenyl	4,4	1,6	34,7	9,1	35,9	7,2	25,6	6,5	24,2	7,2
acenaftylen	6,4	4,4	145,9	15,3	119,6	11,8	102,2	12,1	82,6	13,6
acenaften	0,2	0,6	11,7	1,1	5,0	0,9	2,4	0,8	2,7	0,8
fluoren	0,03	0,7	43,8	0,8	12,9	0,5	8,7	0,6	6,4	0,5
PAH o m/z=165,166	0,05	0,6	35,5	0,6	14,5	0,5	7,3	0,6	5,1	0,5
fenantren	7,1	0,1	122,0	1,6	119,8	1,1	113,0	1,1	101,3	1,0
antracen	0,9	0,01	30,0	0,3	24,6	0,3	23,2	0,2	19,2	0,2
Metyl-fenantreny+cyclopenta[def]fenantren	0	0	52,5	0	22,5	0	19,7	0,1	11,7	0
fenylnaftaleny	0,5	0	8,8	0	8,3	0	7,0	0	1,0	0
fluoranten ²	1,1	0,01	37,3	0,1	34,5	0,1	34,9	0	4,7	0
pyren ³	0,8	0,02	28,8	0,1	26,1	0,1	30,4	0,09	22,0	0,04
benzfluoreny	0	0	3,4	0	1,0	0	1,5	0	0,6	0
methylfluoranten+methylpyren	0	0	7,2	0	2,0	0	2,0	0	1,5	0
PAH o 4 kruzích ⁵ (m/z=226,228)	0	0	14,0	0	9,5	0	10,2	0,04	5,6	0,02
PAH o 5 kruzích ⁶ (m/z=252)	0	0	6,1	0	2,7	0	3,5	0	1,4	0,02
PAH o 6 kruzích ⁷ (m/z=276)	0	0	5,3	0	0,9	0	0,9	0	0,5	0
ostatní látky	4,7	3,0	90,8	34,6	98,3	20,0	56,2	26,7	74,6	22,1
suma DEHET⁸, mg/m³	106	56	2495	510	1919	450	1336	382	1172	380
DEHET dle TAR protokolu, mg/m³	288	168	3934	1247	2827	1153	2161	947	2075	843
Obsah prachových částic, mg/m³	-	<1	400	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1

¹ do této kategorie jsou zahrnuty ostatní látky ze skupiny BTX a alkylbenzeny

² společně s fluorantem je zahrnut i fenantrylen m/z=202, eluující z GC kolony těsně za ním

³ společně s pyrenem je zahrnut i aceantrylen m/z =202, eluující z GC kolony těsně před ním

⁴ benzofuran, dibenzofurany, methylbenzofurany, naftobenzofurany

⁵ benz[c]fenantren, benzo[ghi]fluoranten, 3,4-dihydrocyclopenta(cd)pyren (acepyren), cyclopenta[cd]pyren, benz[a]antracen, chrysen, naftacen

⁶ benzo[j]fluoranten, benzo[k]fluoranten, benzo[e]pyren, benzo[a]pyren, perylen

⁷ indeno[1,2,3-cd]pyren, dibenzo[a,h]antracen, benzo[ghi]perylene, dibenzo[def,mno]chrysen a jiné PAH o m/z=278,302

⁸ tzv. „motorový dehet“

Zkušenosti získané během více než tříletého provozu regenerativního praciho systému umožnily správně nastavit jak teploty absorpce a regenerace praciho oleje, tak i zvolit správný typ organické prací kapaliny zaměřený na to, aby spotřeba praciho oleje byla co nejmenší.

Jak už bylo zmíněno, po rekonstrukci zplyňovacího generátoru došlo k určitým změnám jeho provozních vlastností, které se projevily zvýšením účinnosti a snížením zplyňovacího poměru, změnou složení produkovaného plynu a zároveň i mírným zvýšením obsahu dehtu v surovém plynu (viz Tab. 6, měření ze dne 2011.07.11 a 2012.08.12). Čistící systém se s navýšením obsahu dehtu v surovém plynu poměrně dobře vypořádal. Náznový příklad je uveden na Obr. 7 a jemu odpovídající složení je uvedeno v Tab. 6 (vz. č. 3-6). Absorpční roztoky za olejovou pračkou (D2Z a D4Z) jsou zbaveny zabarvených výševroucích složek dehtu. Jedině u vzorku odebraného před HGF jsou přítomné zachycené TZL. Obsah tzv. „motorového dehtu“ naměřený za olejovou pračkou nepřekročil hodnotu 500 mg/m³ (neboli 1250 mg/m³ dle Tar Protocolu), která byla z hlediska dlouhodobého provozu testovaných motorů (ČKD Hořovice, typ 6S160) bezproblémová a nezpůsobila žádné zanesení spalovacích prostorů a sacích potrubí. O dostatečné účinnosti čištění plynu před vstupem do motoru svědčí také fakt, že cirkulující chladicí voda použitá ve vodní pračce (viz Obr. 2, M.P.) během dalšího provozu neztratila svou původní průhlednost a i po delším provozu vykazovala minimální znečištění organickými sloučeninami, a to hlavně zbytky pracího oleje.

Na závěr lze konstatovat, že prezentovaná malá elektrárna využívající souproudý zplyňovací generátor a upravený starší motor je schopna dlouhodobého provozu v bezobslužném stavu. Účinnost výroby elektrické energie se pohybuje okolo 24 % vztažených na původní palivo a veškeré získané teplo se používá pro komunální účely výrobního podniku. Zbytkové teplo z motorových spalin se po jejich ochlazení na teplotu okolo 150°C, používá pro sušení surové štěpky. Na základě dlouhodobého sledování uvedeného zařízení a jeho srovnání s podobnými aplikacemi uvedenými v Tab. 1 lze konstatovat, že z hlediska základních technologických parametrů (spotřeby paliva a účinnosti), spolehlivosti provozu, složení a kvality produkovaného plynu se jedná o nejlepší a nejvíce propracovaný dlouhodobě pracující systém kogenerační výroby elektrické energie a tepla v ČR.

ZÁVĚR A VYHLÍDKY DO BUDOUCNA

Ještě lepšího využití energie plynu lze dosáhnout při použití účinnějšího motoru, třeba přeplňovaných motorů Jenbacher řady J2XX, nebo J3XX. Uvedené motory umožňují dosažení skoro 36 % účinnosti výroby elektrické energie z plynu o uvedeném složení.[22] V kombinaci se stávajícím generátorem (GP300) vyrábějícím plyn se 75 % účinností lze dosáhnout až 27 % účinnosti výroby elektrické energie. Při přechodu na modernější přeplňované motory lze očekávat přísnější požadavky na kvalitu produkovaného plynu. Stávající čistící systém elektrárny využívající vysokoteplotního odstraňování TZL z plynu a absorpci dehtu v olejové pračce je schopen tyto požadavky zajistit.

Efektivnějším řešením kombinované výroby elektrické energie a tepla z biomasy je technologie využívající současně účinnějšího zplyňovacího a čistícího systému založená na větší míře rekuperace procesního tepla. Elektrárna postavená s použitím souproudého generátoru (GP300) využívá tohoto principu v maximální míře a právě to umožnilo dosažení až 75 % účinnosti výroby studeného plynu (oproti 65 % u běžných souproudých generátorů). Další zvyšování účinnosti u uvedeného typu generátoru vzhledem k jeho specifice je značně problematické.

Pro zvýšení účinnosti výroby elektrické energie je nutno použít moderní termokonverzní technologií s vyšší účinností výroby studeného plynu. Prvním klíčovým principem úspěšného vývoje je zvýšení účinnosti výroby hořlavého plynu na hodnotu okolo 90 %, která s použitím moderních spalovacích motorů umožní dosažení 32 % účinnosti ve výrobě elektrické energie. Druhým klíčovým požadavkem je využití principu vysokoteplotní konverze pro odstraňování dehtu z plynu, kdy tyto sloučeniny jsou konvertovány na hořlavé plynné složky. Realizace druhého principu umožňuje podstatně snížit investiční a hlavně provozní náklady zařízení spojené s čištěním plynu a odstraňováním nežádoucích sloučenin.

V současné době v rámci projektu VAV agentury TAČR a aktivit zaměřených na vývoj nového vysoce účinného generátoru probíhají práce zaměřené na komplexní řešení problematiky vysoce efektivní výroby elektrické energie. V roce 2010 byl zahájen vývoj vysokoteplotního regeneračního čištění plynu a nového vícestupňového generátoru využívajících uvedených principů ve svých konstrukcích. Na začátku roku 2012 byla zahájena stavba nového typu generátoru, který ve stávající elektrárně nahradil souproudý generátor GP300 se zachováním a modernizací stávajícího systému olejové pračky a vysokoteplotního čištění plynu (modernizace HGF, 2011). První experimenty byly provedeny v průběhu roku 2012.

Vzhledem k nové koncepci použité v návrhu vícestupňového generátoru a některým technickým problémům spojeným s jeho oživením a zahájením zkušebního provozu, byly první relevantní výsledky ohledně funkceschopnosti systému a vlastností plynu získány v půli roku 2012. Podrobnější popis nového generátoru bezesporu zasluhuje samostatnou rozsáhlou publikaci. Zde lze stručně konstatovat, že hlavní klíčové body definované v návrhu, jako vysoká účinnost výroby plynu (>85%) a nízký obsah dehtu v surovém plynu (pod 50 mg/m³) byly dosaženy. Podrobnější informace o vlastnostech uvedeného zařízení a současném stavu věcí budou prezentovány na připravovaném semináři o problematice zplyňování, který proběhne začátkem prosince v Jihlavě. Součástí plánované prezentace je také sdělení dosavadních zkušeností s realizací největší komerční vysoce efektivní technologie realizované v Odrách, kde jsou instalovány celkem dva podobné generátory o instalovaném výkonu 1050 kW_e. [23]

Stávající a nově vyvinuté zařízení (generátory, štěpkovače, sušárny, systémy čištění plynu) lokalizované v areálu společností Tarpo s.r.o. bude i nadále používány k výzkumným aktivitám zaměřeným na vývoj a komerční realizaci nových technologií, spojených s problematikou termochemické konverze různých druhů biomasy.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Babu S.P.: Perspectives on Biomass Gasification, IEA Bioenergy Agreement, Task 33: Thermal Gasification of Biomass, May 2006 (<http://media.godashboard.com/gti/IEA/IEAWS1Report5-06rev7-07.pdf>, platná 12.06.2010).
- [2] <http://hn.ihned.cz/c1-43700090-v-plzni-startuje-obri-kotel-na-biomasu> (plátina dne 12.07.2010).
- [3] Zelená energie, Plzeňská teplárenská, a.s. (<http://www.pltep.cz/upload/File/teplarna-letak-zelena-energie.pdf>, plátina dne 30.08.2010).
- [4] Plzeňská teplárenská spaluje v kotli na biomasu mláto z Prazdroje. Zpráva s tisku (<http://biom.cz/cz/zpravy-z-tisku/plzenska-teplarenska-spaluje-v-kotli-na-biomasu-mlato-z-prazdroje>, plátina dne 30.08.2010).
- [5] Beňo Z., Barger A., Skoblia S., Pícek I.: Laboratorní stanovení emisí při sušení tuhých biopaliv s vysokým obsahem vlhkosti, PALIVA 3 (2011), 69 – 76.
- [6] Buryan P., Skoblia S., Dedek K., Lisý M., Ochodek T., Najser J.: Plynové turbíny s externě zahříváním pracovním médiem v kogeneračních jednotkách, PALIVA 3 (2011), 103 – 110.
- [7] Henriksen U., Ahrenfeldt J., Jensen T. K., Gøbel B., Benzen J.D., Hindsgaul C., Sørensen L. H.: The design, construction and operation of a 75 kW two-stage gasifier, Energy 31 (2006) 1542–1553.
- [8] Pohořely M., Jeremiáš P., Kameníková P., Skoblia S., Svoboda K., Punčochář M.: Zplyňování biomasy., Chem. Listy 106, 264-274 (2012).
- [9] Beňo Z., Skoblia S., Buryan P., Malecha J.: Zkušenosti s provozem souprůdných zplyňovacích generátorů typu Imbert v České republice., ENERGETIKA A BIOMASA 2009, 18-19.02.2009, ČVUT, Praha 2009, sborník příspěvků, 150-158.
- [10] Beňo Z., Skoblia S.: Souprůdné zplyňovací generátory a jejich použití pro výrobu elektrické energie z biomasy., ENERGIE Z BIOMASY X, Sborník příspěvků, 15-20 ISBN 978-80-214-4027-2.
- [11] Beňo Z., Skoblia S.: Porovnání kvality plynu produkovaných souprůdnými generátory v České republice, ENERGIE Z BIOMASY XI, 29-35, ISBN 978-80-214-4243-6.
- [12] Zplyňování biomasy - Dehet a částice v plynných produktech -Vzorkování a analýza. ČSN P CEN/TS 15439.
- [13] Neeft J.P.A. and coll.: Guideline for Sampling and Analysis of Tar and Particles in Biomass Producer Gases. Version 3.3, Energy project ERK6-CT1999-20002.
- [14] Beňo Z. Skoblia S.: Comparison of downdraft gasifiers used for combined generation of electric energy and heat in the Czech Republic, IFC 2010, 3-6 May, Dresden.
- [15] Černohorský J.: Dřevní plyn z pohledu výrobce spalovacího motoru, seminář: Elektřina s vůní dřeva, 9 prosince, Domašov, 2008.
- [16] Skoblia S. Úprava složení plynu ze zplyňování biomasy, Doktorská disertační práce, VŠCHT Praha 2004.
- [17] Malenshek M, Olsen D. B.: Methane number testing of alternative gaseous fuels, Fuel 88 (2009) 650–656.
- [18] Moersch O., Splietho H., Hein K.R.G., Tar quantification with a new online analyzing method, Biomass and Bioenergy, Vol. 18, s. 79 (2000).

- [19] Dej M., Chlod R., Ochodek T.: Tsp in the gas and thein removing in biomass gasification process with cogeneration unit. Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, Mechanical Series, No. 2, 2010, vol. LVI, article No. 1782.
- [20] Rauch R.: Integration Aspects in the Next Generation of CHP Plants Based on GasificationInternational Seminar on Gasification 2012, 18-19 October, Kungsholmen Konferens, Stockholm, Sweden (http://www.sgc.se/gasification2012/Resources/ISG2012_Reinhard_Rauch.pdf).
- [21] Beňo Z., Buryan P., Skoblja S.: Výroba elektrické energie z dřevní štěpky v komplexní kogenerační jednotce. Technická zpráva, Vývoj a výzkum zařízení zplynování odpadů ze dřeva ve formě dřevní štěpky, srpen 2011.
- [22] Technické informace společnosti Jenbacher, 2012, osobní komunikace.
- [23] Pícek I., Seminář Elektřina s vůní dřeva aneb znovuobjevený dřevoplyn, Jihlava, Business Hotel Jihlava, 12.12.2012.

Poděkování

Část práce prezentovaná v uvedené publikaci vznikla díky finanční podpoře projektu Technologické agentury České republiky číslo TA01021279